



UNIVERSITÉ ECHAHID HAMMA LAKHDAR EL-OUED

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

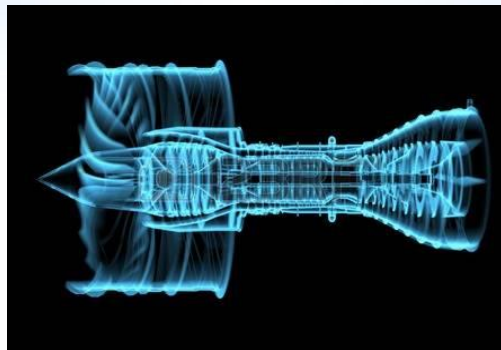


# Cours de Turbomachines Approfondies

Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Energétique

Présentée par :

Dr. ATIA Abdelmalek



Semestre : 2  
 Unité d'enseignement : UEF 1.2.2  
 Matière : Turbomachines approfondies  
 VHS : 45h00 (cours : 1h30, Td : 1h30 )  
 Crédits : 4  
 Coefficient : 2

#### Objectifs de l'enseignement :

Décrire, à partir des notions de base (de turbomachines et de mécanique des fluides) les méthodes de conception, d'analyse et de construction des turbomachines pour permettre aux étudiants la compréhension des écoulements qui s'établissent dans les turbomachines et pour développer des éléments de base pour la conception et la sélection de ces machines.

#### Connaissances préalables recommandées :

Thermodynamique, transfert thermique, mécanique des fluides, Turbomachines

#### Contenu de la matière :

**Chapitre1.** Rappel sur les turbomachines, classification, notion de similarité, nombres sans dimensions et triangles de vitesses, équation d'Euler des turbomachines (3 semaines)

**Chapitre2.** Aérodynamique des grilles d'aubes (3 semaines)  
 2.1 Efforts aérodynamiques (portance et traînée)

2.2 Corrélations pour la conception des grilles d'aubes (solidité, déviation, déflexion,...

**Chapitre3.** Ecoulement 2D dans les turbomachines (4 semaines)

3.1 Équation de l'équilibre radial simplifié

3.2 Théorie des disques actuateurs

3.3 Écoulement aube à aube

3.4 Couches limites et notion de transition

**Chapitre4.** Ecoulement 3D dans les turbomachines (3 semaines)

4.1 Équations gouvernantes

4.2 CFD pour les turbomachines (applications et limites)

4.3 Écoulement in-stationnaire et interaction Stator-Rotor

4.4 Refroidissement des turbomachines

4.5 Pertes dans les turbomachines (de profils, du aux écoulements secondaires, de

jeu,....

4.6 Techniques de mesure en turbomachines

**Chapitre 5.** Construction des turbomachines (2semaines)

5.1 Organes des turbomachines : paliers, accouplements, réducteurs, systèmes de lubrification et d'étanchéité

5.2 Construction des turbines à vapeur : tuyères, ailettes, efficacité d'un étage, corps et diaphragme, rotor, matériau, équilibrage, soupapes et vannes d'admission de vapeur, régulation de vitesse

5.3 Turbines à gaz : compresseur, chambre de combustion, turbine, carburants

5.4 Compresseurs : centrifuges, axiaux, alternatifs, utilisation.

**Mode d'évaluation :** Contrôle Continu : 40%, Examen : 60%.

# Contenu de Cours

#### Connaissances préalables recommandées :

Thermodynamique, transfert thermique, mécanique des fluides, Turbomachines

#### Contenu de la matière :

**Chapitre1.** Rappel sur les turbomachines, classification, notion de similarité, nombres sans dimensions et triangles de vitesses, équation d'Euler des turbomachines (3 semaines)

**Chapitre2.** Aérodynamique des grilles d'aubes (3 semaines)  
 2.1 Efforts aérodynamiques (portance et traînée)

2.2 Corrélations pour la conception des grilles d'aubes (solidité, déviation, déflexion,...

**Chapitre3.** Ecoulement 2D dans les turbomachines (4 semaines)

3.1 Équation de l'équilibre radial simplifié

3.2 Théorie des disques actuateurs

3.3 Écoulement aube à aube

3.4 Couches limites et notion de transition

**Chapitre4.** Ecoulement 3D dans les turbomachines (3 semaines)

4.1 Équations gouvernantes

4.2 CFD pour les turbomachines (applications et limites)

4.3 Écoulement in-stationnaire et interaction Stator-Rotor

4.4 Refroidissement des turbomachines

4.5 Pertes dans les turbomachines (de profils, du aux écoulements secondaires, de jeu,....

4.6 Techniques de mesure en turbomachines

**Chapitre 5.** Construction des turbomachines (2semaines)

5.1 Organes des turbomachines : paliers, accouplements, réducteurs, systèmes de lubrification et d'étanchéité

5.2 Construction des turbines à vapeur : tuyères, ailettes, efficacité d'un étage, corps et diaphragme, rotor, matériau, équilibrage, soupapes et vannes d'admission de vapeur, régulation de vitesse

5.3 Turbines à gaz : compresseur, chambre de combustion, turbine, carburants

5.4 Compresseurs : centrifuges, axiaux, alternatifs, utilisation.

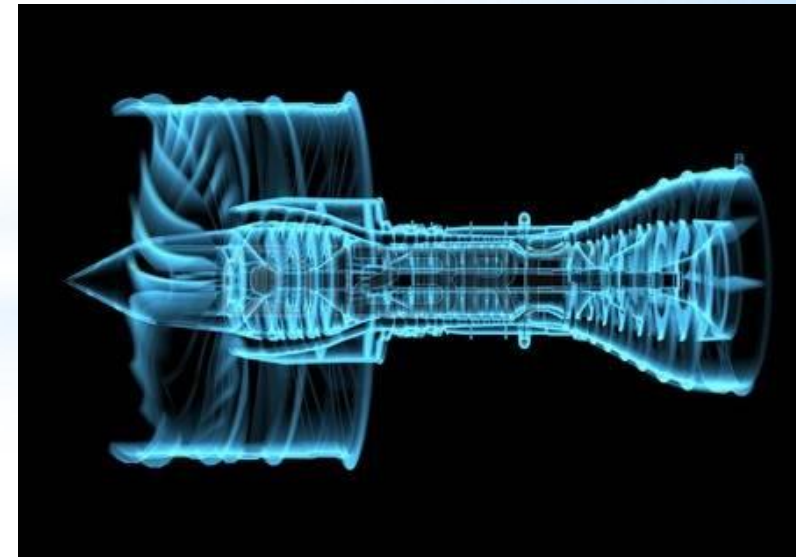
# Chapitre I :

## Introduction aux Turbomachines

1. Définition les turbomachines
2. Domaine d'application des turbomachines
3. Famille des Turbomachines
4. Classification des Turbomachines
5. Construction des turbomachines
6. Techniques de mesure en turbomachines

# 1. Définition les turbomachines

Les turbomachines forment une catégorie importante d'appareils transformatrice d'énergie par l'utilisation d'un fluide. De manière générale, une turbomachine est définie comme un dispositif qui permet de donner ou de retirer de l'énergie à un fluide par l'action dynamique d'un élément rotatif appelé le rotor. Le préfixe turbo provient du latin turbinis qui signifie qui tourne ou alors en rotation. Historiquement il a été introduit en France en 1822 par l'ingénieur de mines Claude Burdin (1790-1873).



## 2. Domaine d'application des turbomachines

On rencontre les turbomachines dans un grand nombre d'applications nécessitant un transfert d'énergie. Essentiellement, on distingue trois types d'applications :

Production d'électricité :  
turbines à gaz, turbines à  
vapeur, turbines hydrauliques;

Industrie lourde : compresseurs  
centrifuges, turbocompresseur pour  
moteur diesel, turbines à vapeur,  
turbines à gaz, pompes et ventilateurs.

Propulsion : turbines à  
gaz d'aviation, turbines à  
gaz de navires;



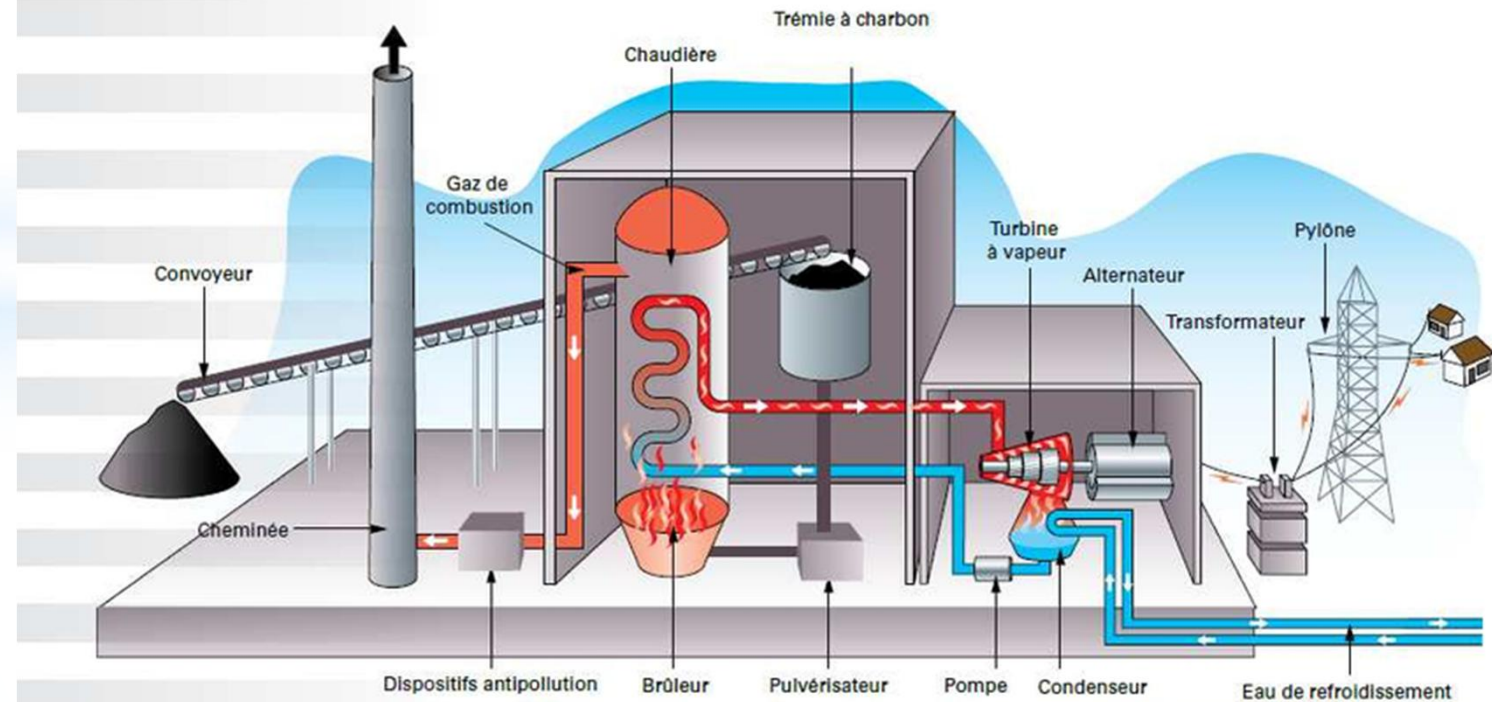
## 2. Domaine d'application des turbomachines

Production d'électricité : turbines à gaz, turbines à vapeur, turbines hydrauliques;

Centrale thermique



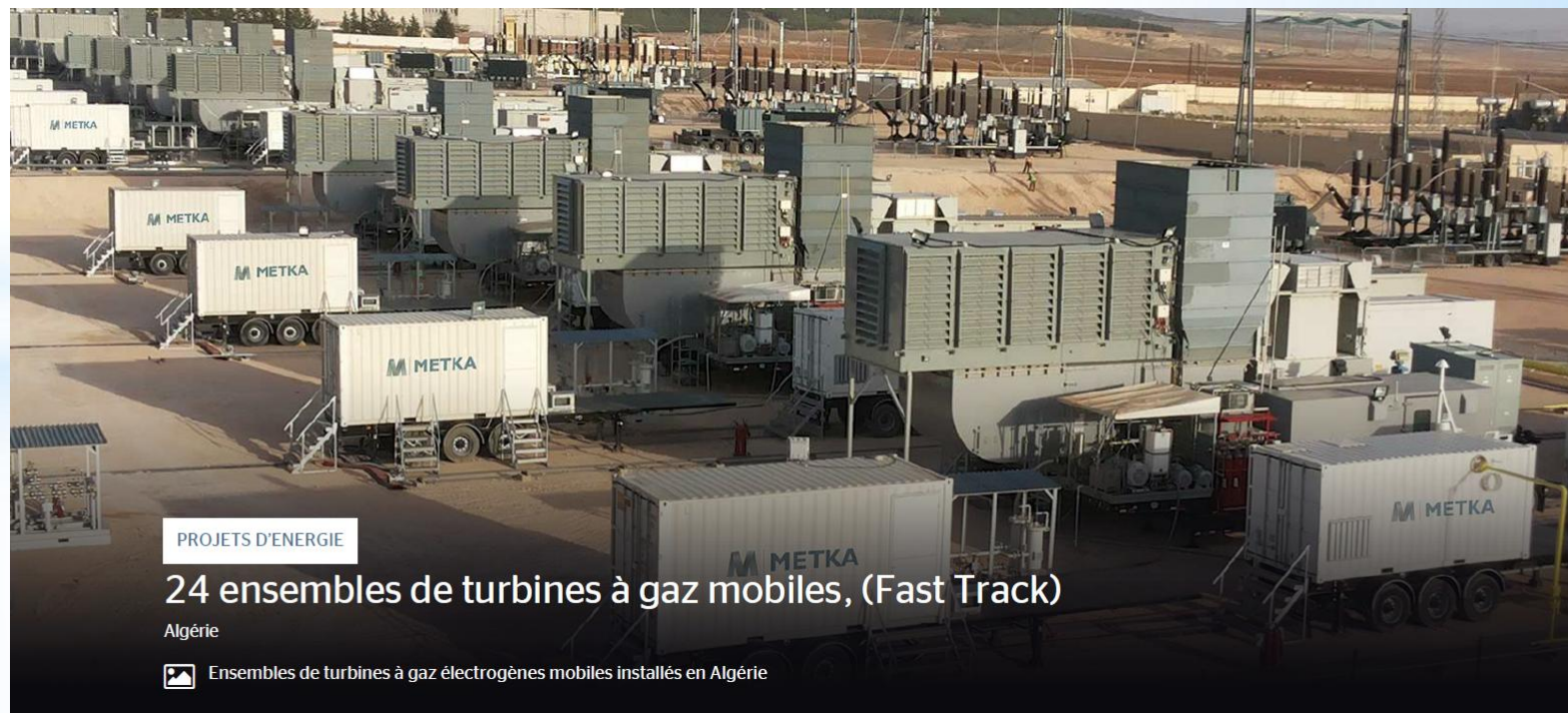
### CENTRALE THERMIQUE



## 2. Domaine d'application des turbomachines

Production d'électricité : turbines à gaz, turbines à vapeur, turbines hydrauliques;

Centrale thermique

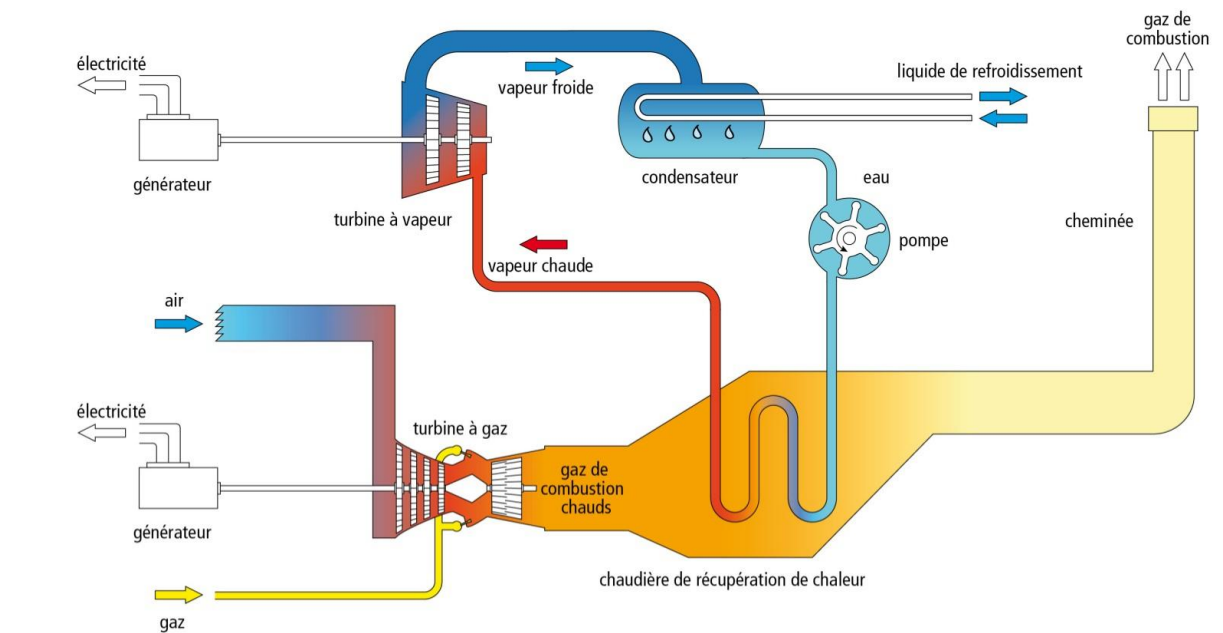


## 2. Domaine d'application des turbomachines

Production d'électricité : turbines à gaz, turbines à vapeur, turbines hydrauliques;



### Centrale à cycle combiné



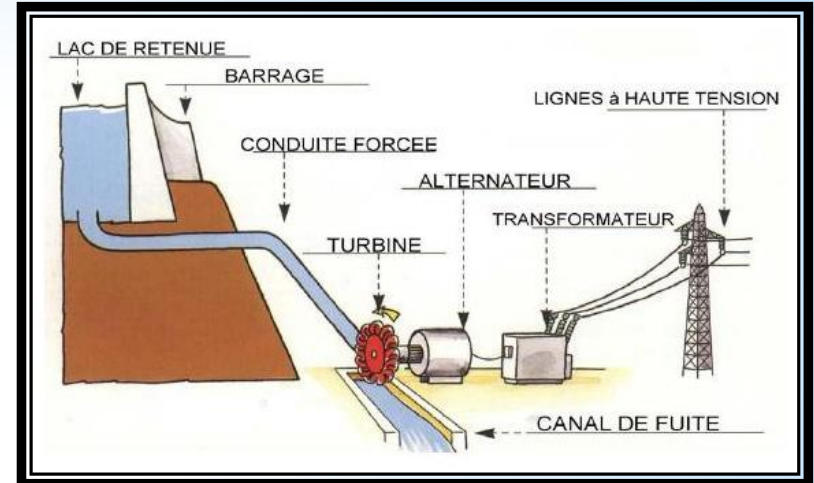
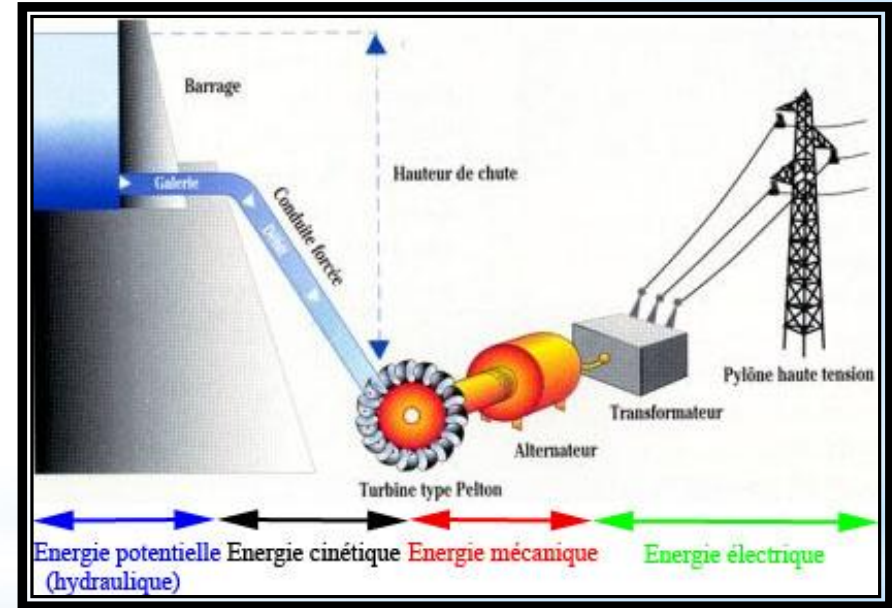
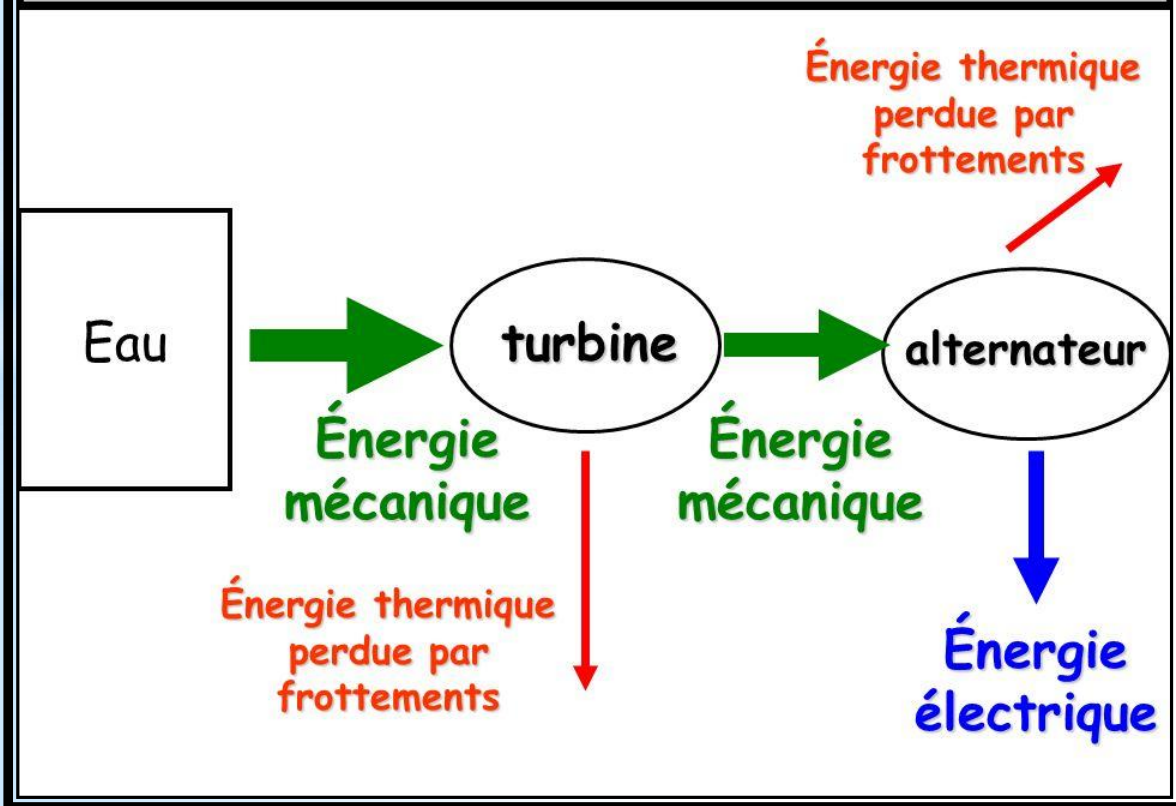


## 2. Domaine d'application des turbomachines

Centrale hydrauliques

Production d'électricité : Centrale hydrauliques

### Chaîne énergétique de la centrale hydraulique



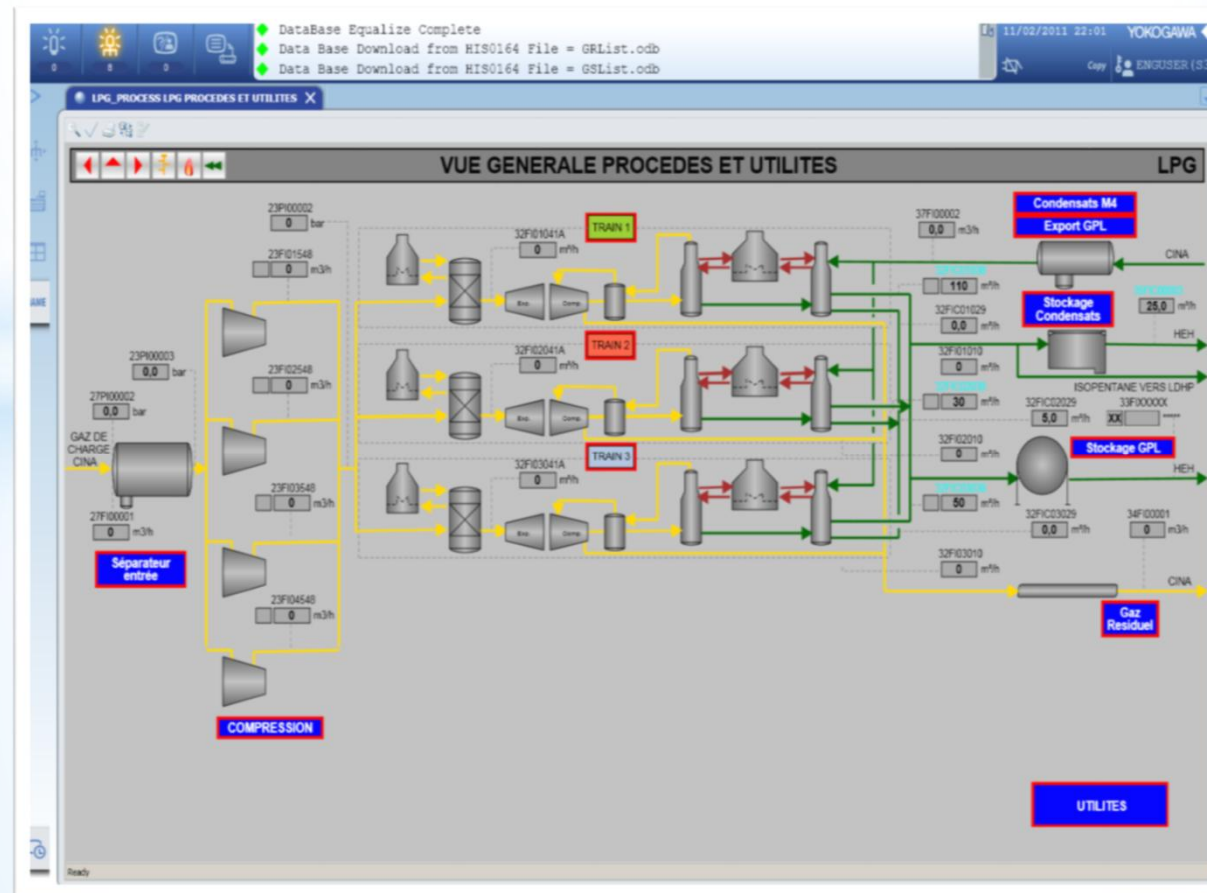
## 2. Domaine d'application des turbomachines

Production d'électricité : ferme éolienne



## 2. Domaine d'application des turbomachines

Industrie lourde : compresseurs centrifuges, turbocompresseur pour moteur diesel, turbines à vapeur, turbines à gaz, pompes et ventilateurs.



## 2. Domaine d'application des turbomachines

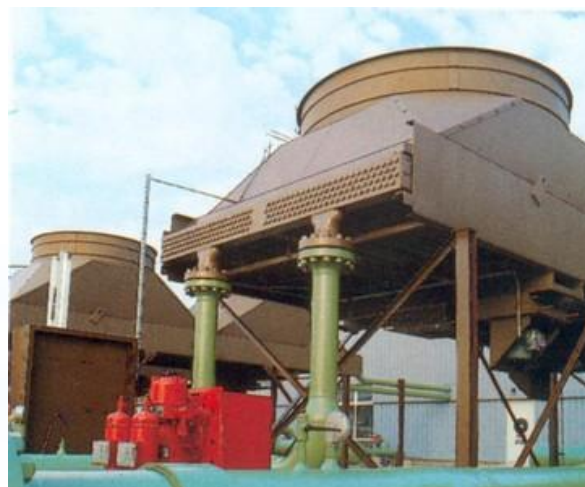
Industrie lourde : compresseurs centrifuges, turbocompresseur pour moteur diesel, turbines à vapeur, turbines à gaz, pompes et ventilateurs.

## 2. Domaine d'application des turbomachines

Industrie lourde : compresseurs centrifuges, turbocompresseur pour moteur diesel, turbines à vapeur, turbines à gaz, pompes et ventilateurs.

## 2. Domaine d'application des turbomachines

Industrie lourde : compresseurs centrifuges, turbocompresseur pour moteur diesel, turbines à vapeur, turbines à gaz, pompes et ventilateurs.



aéroréfrigérants



## 2. Domaine d'application des turbomachines

Propulsion : turbines à gaz d'aviation, turbines à gaz de navires;



Redresseur  
Aubages fixes  
flux secondaire

Redresseur  
Aubages fixes  
flux primaire

Source : Pilote-Virtuel.com/ Photo: Jujuk



Download from  
Dreamstime.com

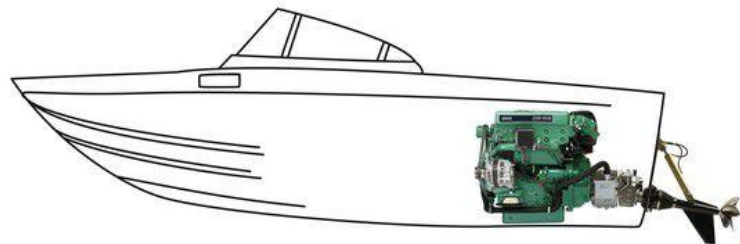


Photo: F.Robert

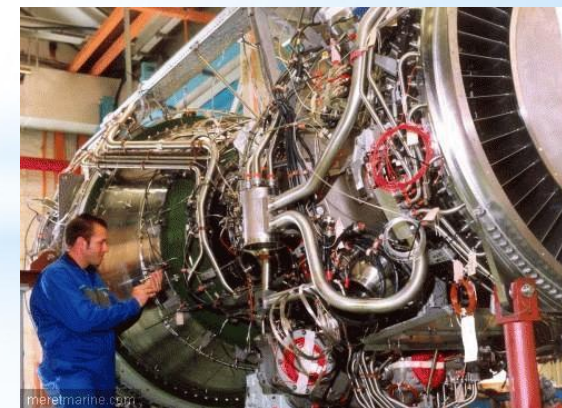


## 2. Domaine d'application des turbomachines

Propulsion : turbines à gaz d'aviation, turbines à gaz de navires



© Can Stock Photo





# 3. Famille des Turbomachines

Les Pompes



Les Turbines



Les compresseurs

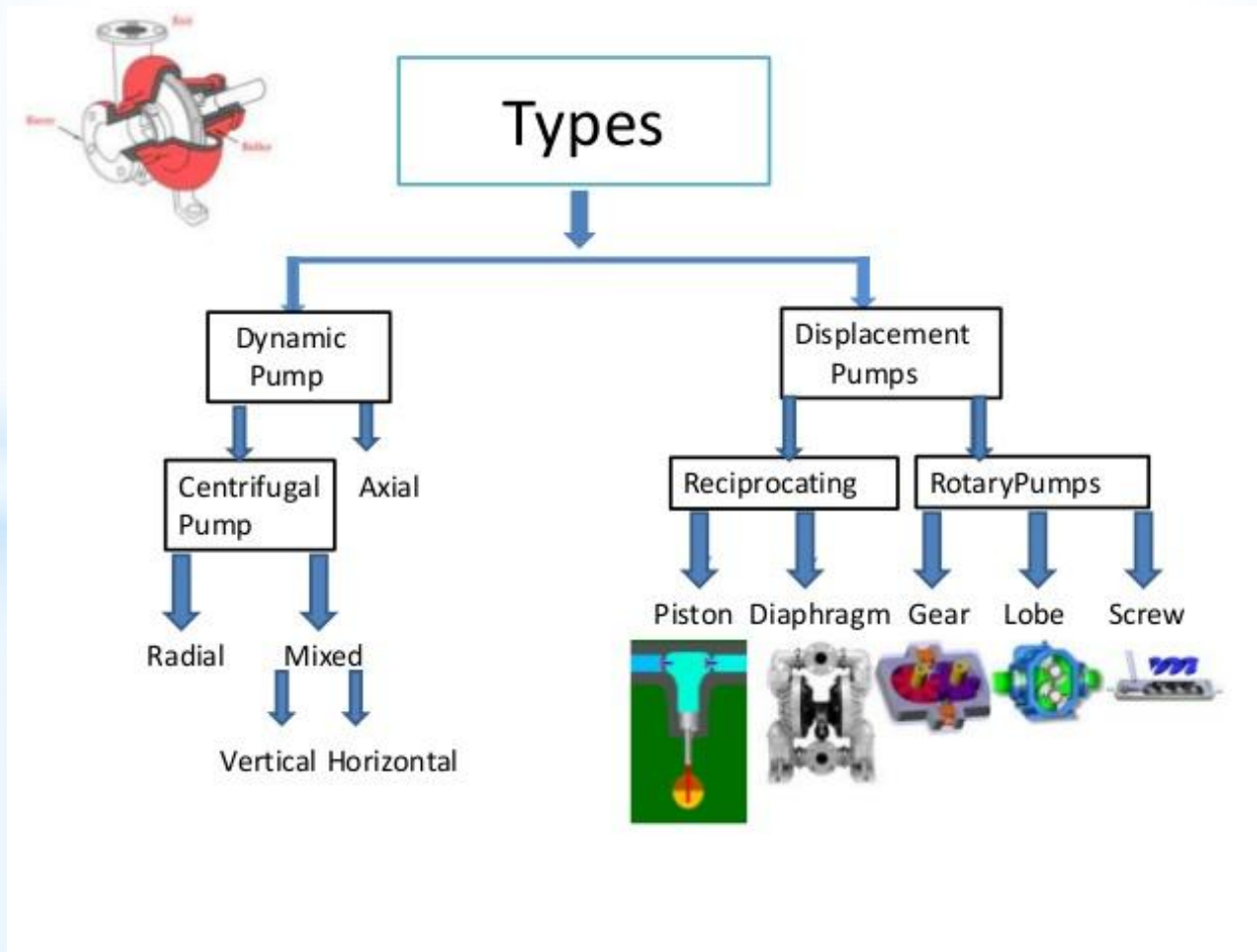


Les Ventilateurs



# 3. Famille des Turbomachines

## Les Pompes

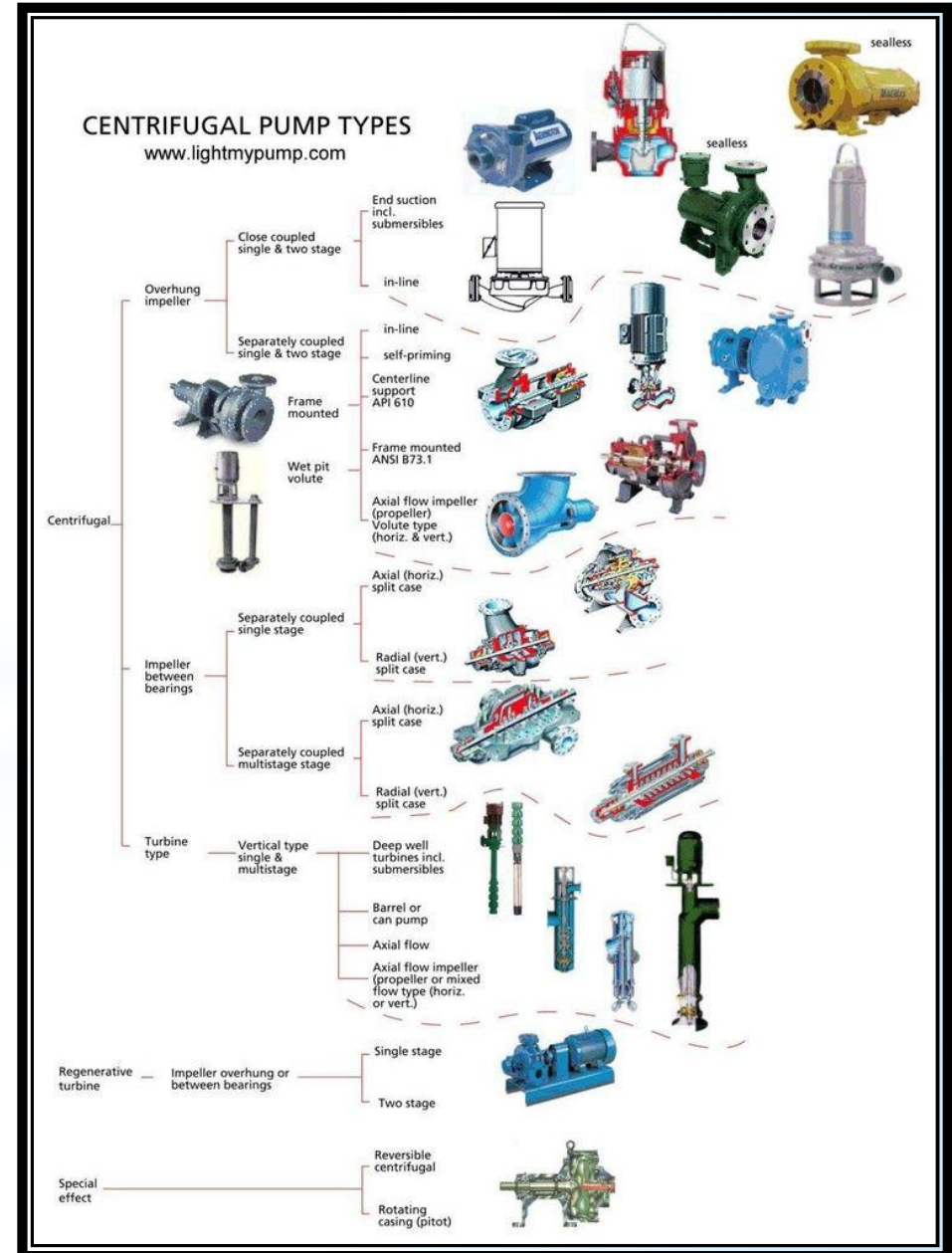


# 3. Famille des Turbomachines



## Les Pompes centrifuge

Les pompes centrifuges sont les plus courantes dans l'industrie lourds, du fait de leur simplicité de conception, de leur coût généralement moindre qu'une pompe volumétrique équivalente et de leur aptitude à transporter des liquides même chargés (de particules solides).



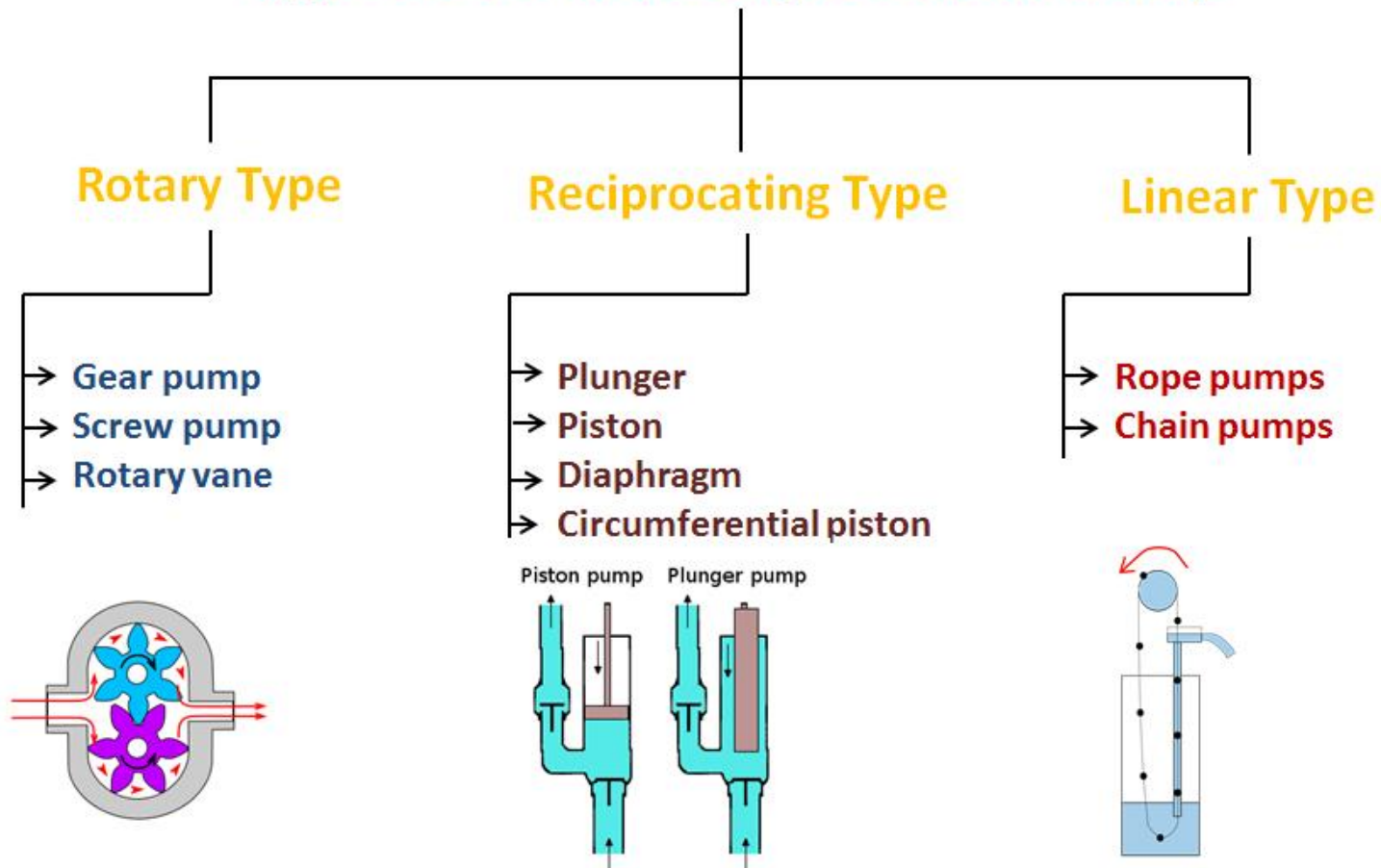
### 3. Famille des Turbomachines

## Pompes centrifuges

# 3. Famille des Turbomachines

## Les Pompes

### Types of Positive Displacement Pump



## 3. Famille des Turbomachines

Les Pompes

**Pompes centrifuges**

**Pompes**

**Pompes à piston**



### 3. Famille des Turbomachines

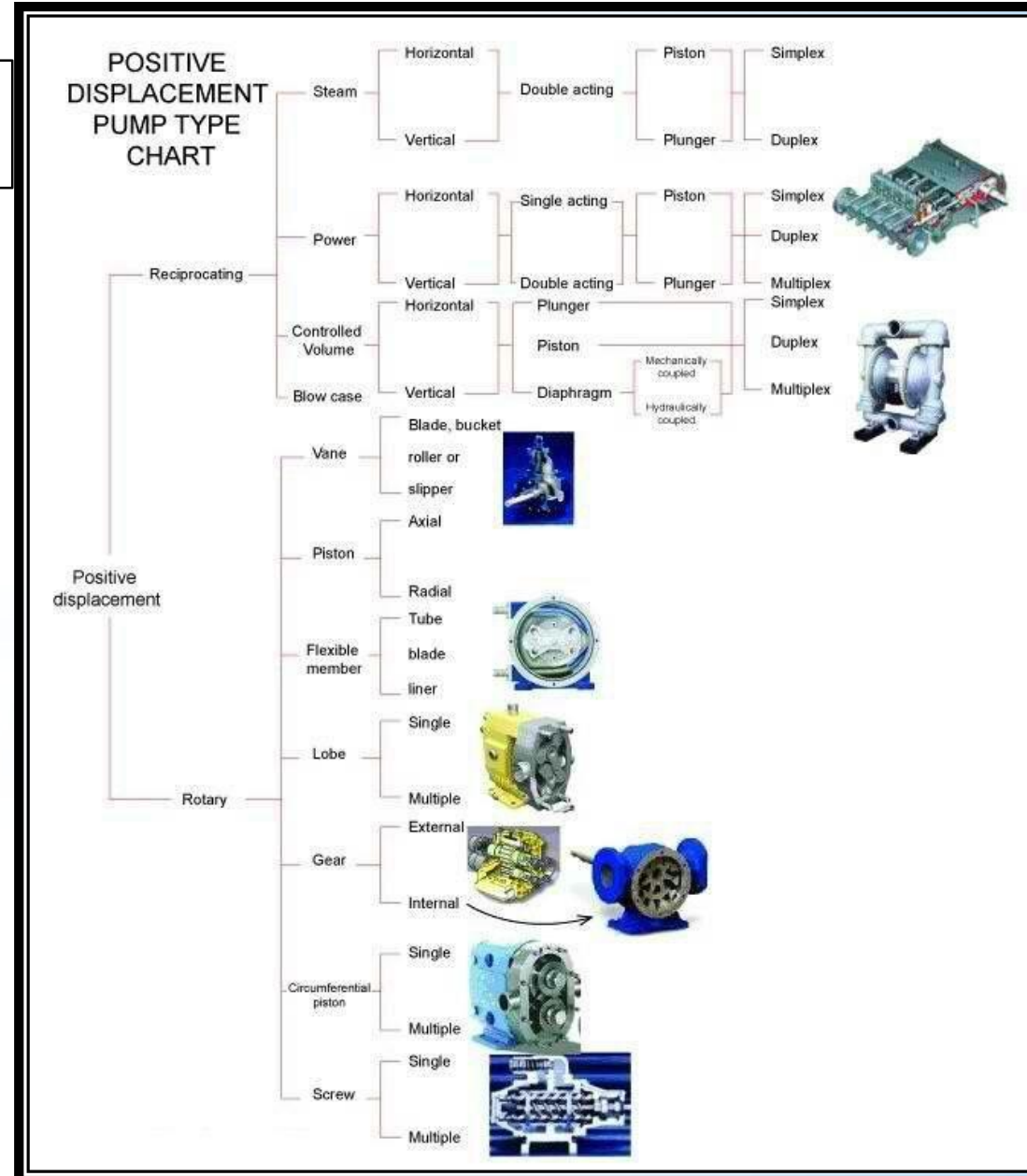
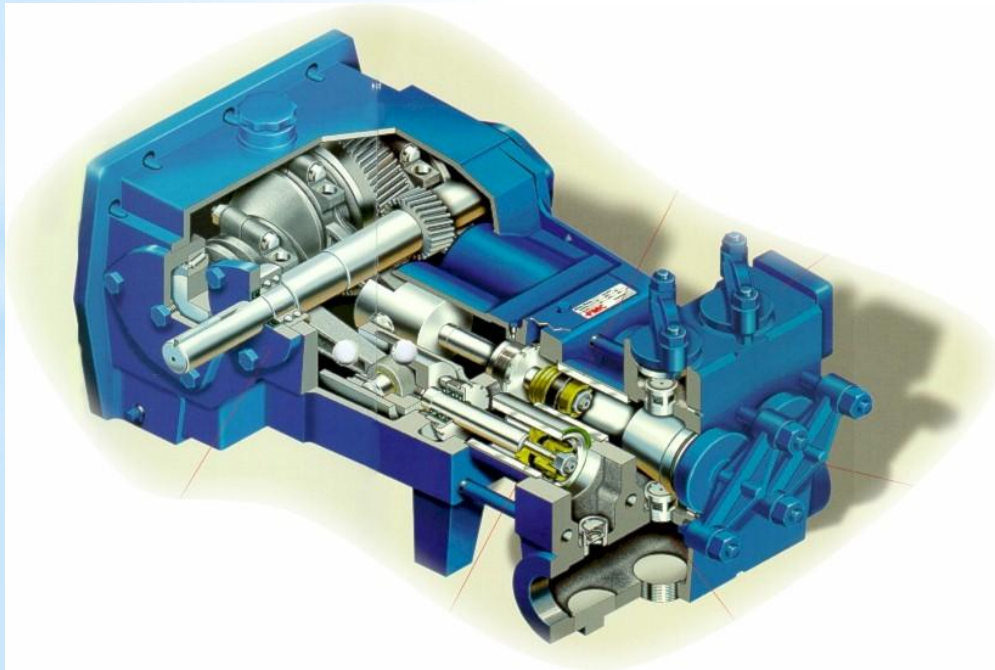
Les Pompes

**Pompes à  
piston**



# 3. Famille des Turbomachines

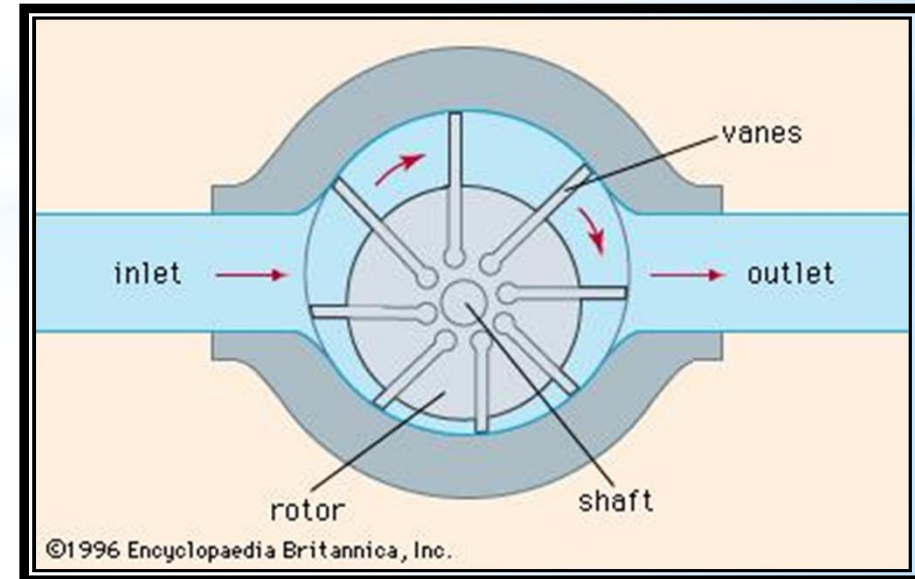
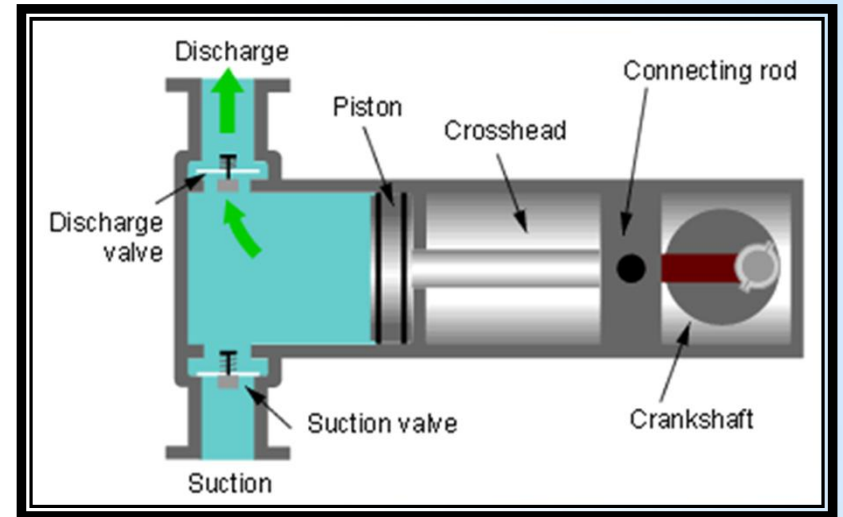
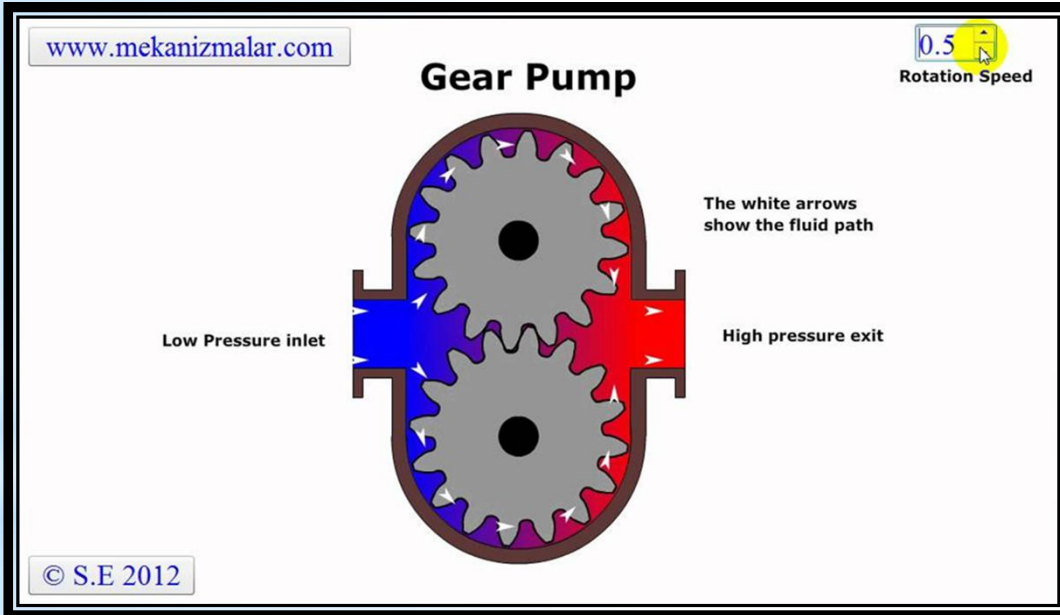
## Les Pompes





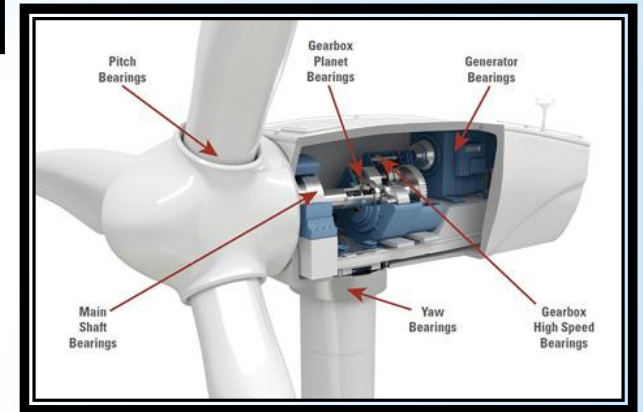
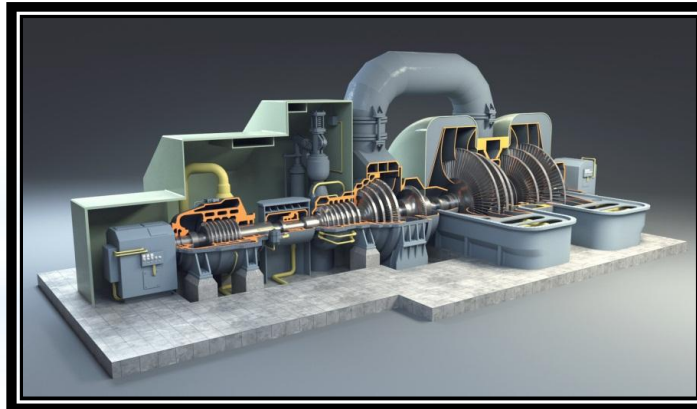
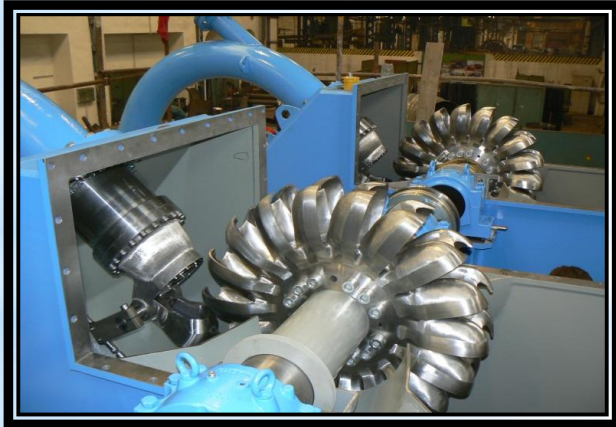
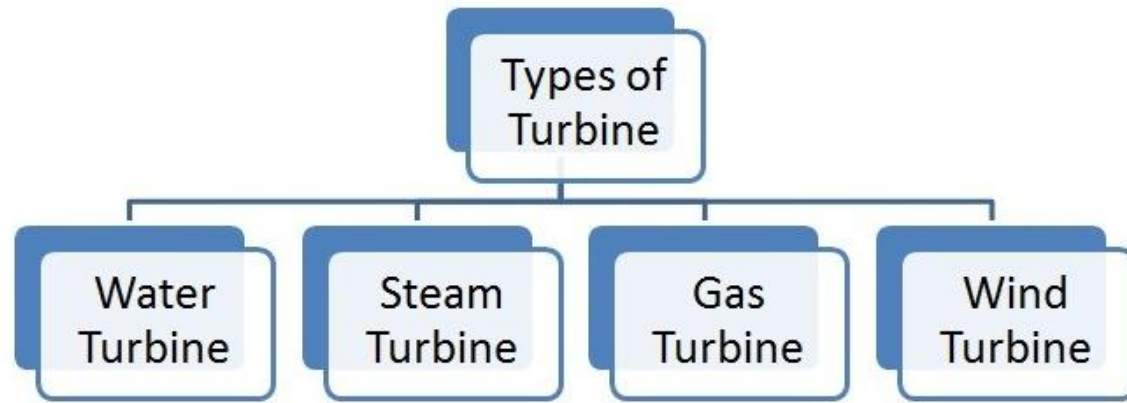
# 3. Famille des Turbomachines

## Les Pompes



# 3. Famille des Turbomachines

## Les Turbines



### 3. Famille des Turbomachines

## Turbine hydraulique

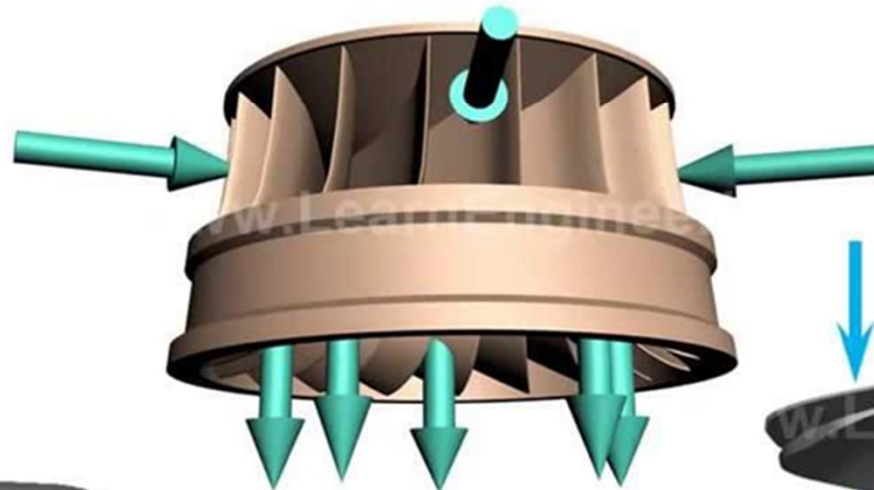
PELTON

FRANCIS

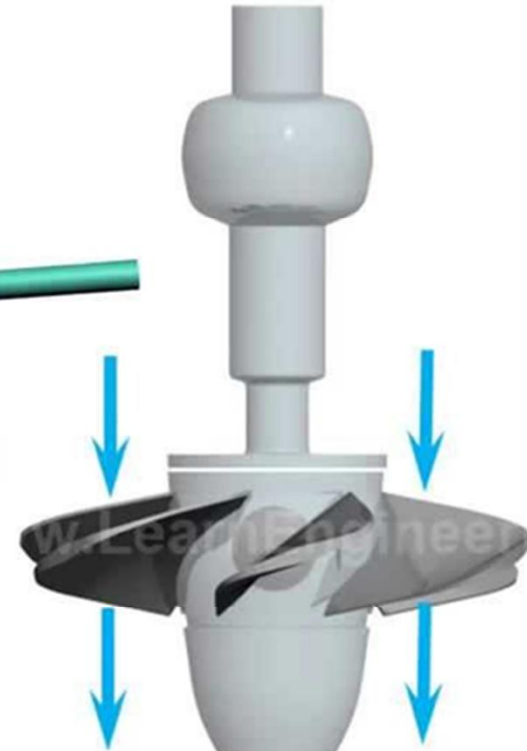
KAPLAN



TANGENTIAL



MIXED

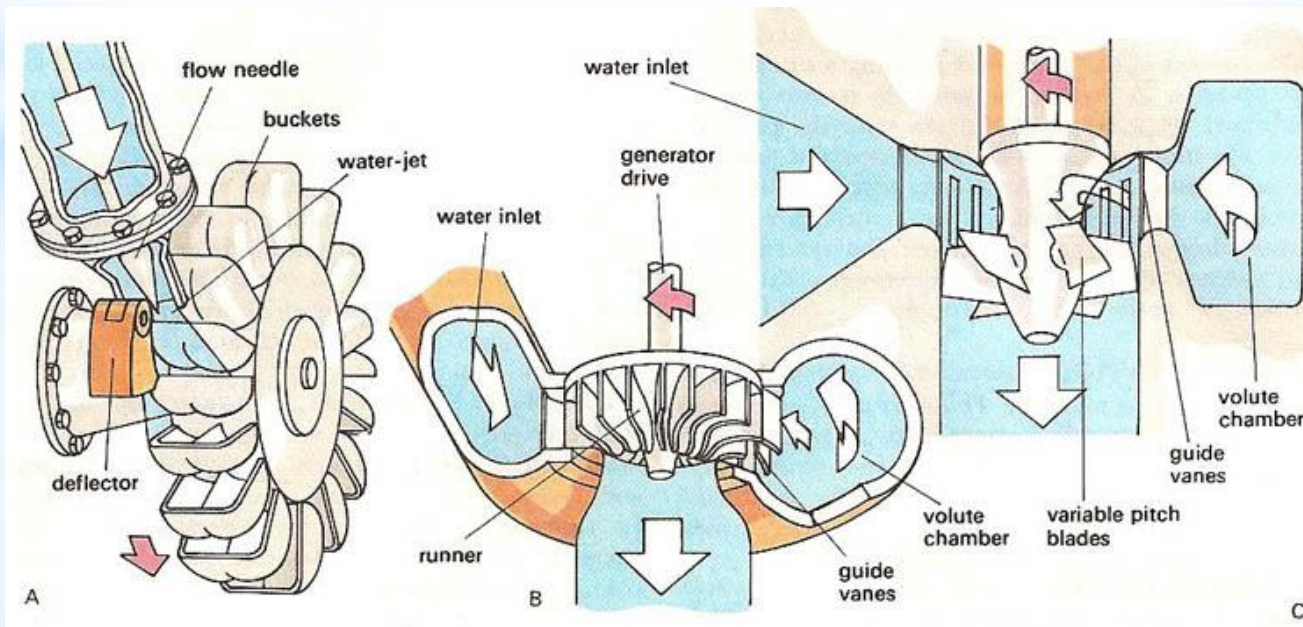
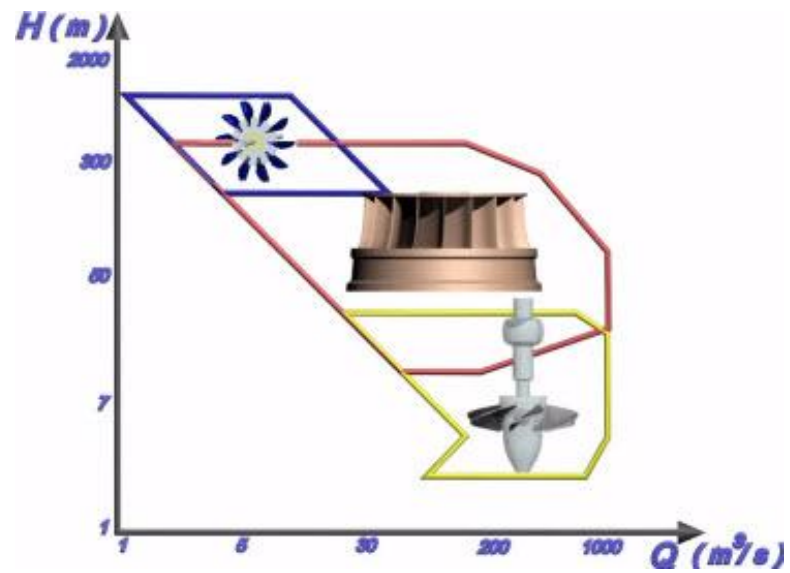


AXIAL

HYDRAULIC TURBINE

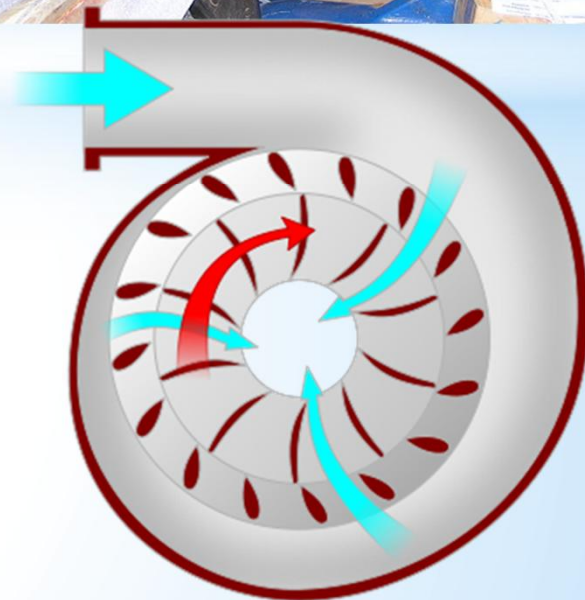
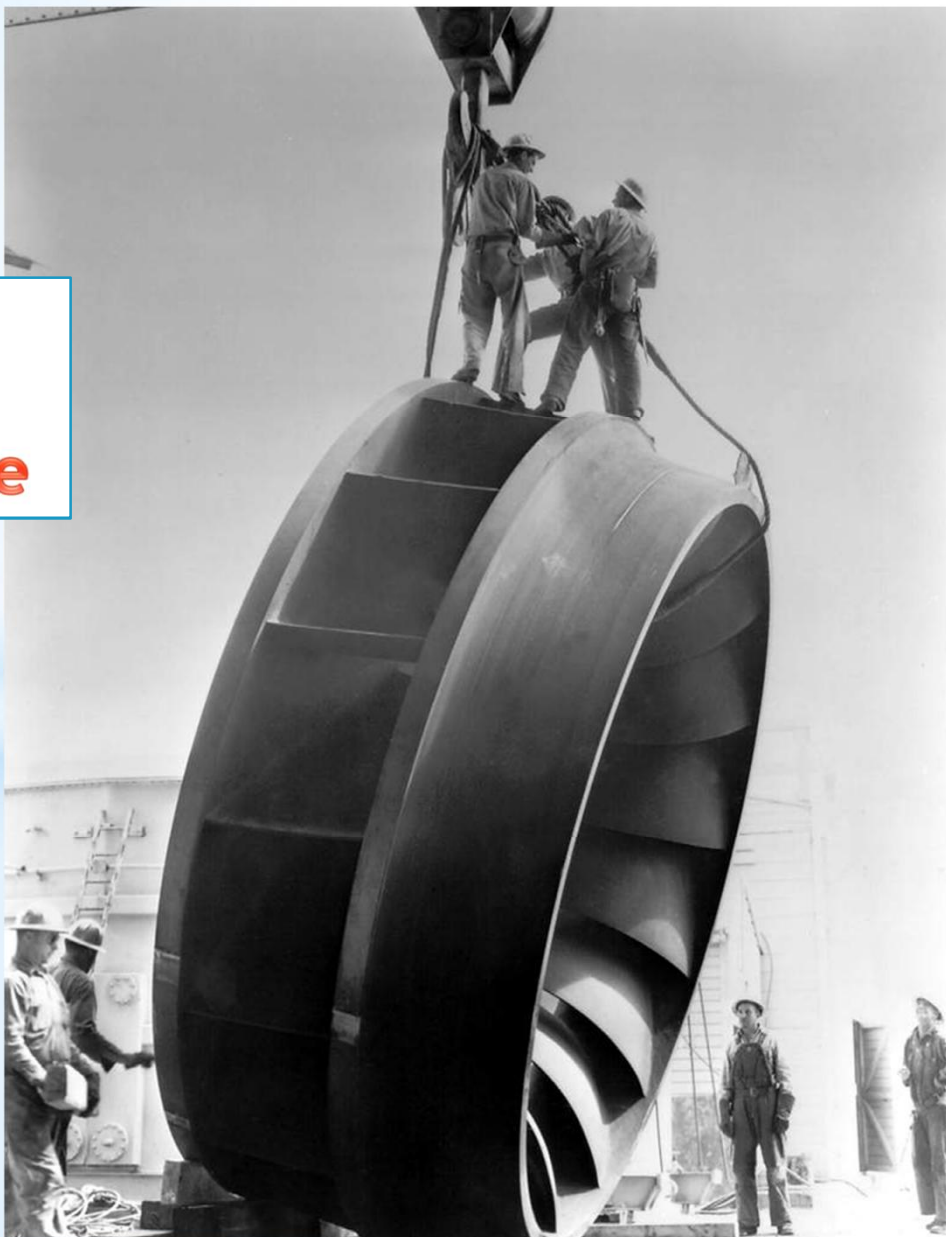
### 3. Famille des Turbomachines

## Turbine hydraulique



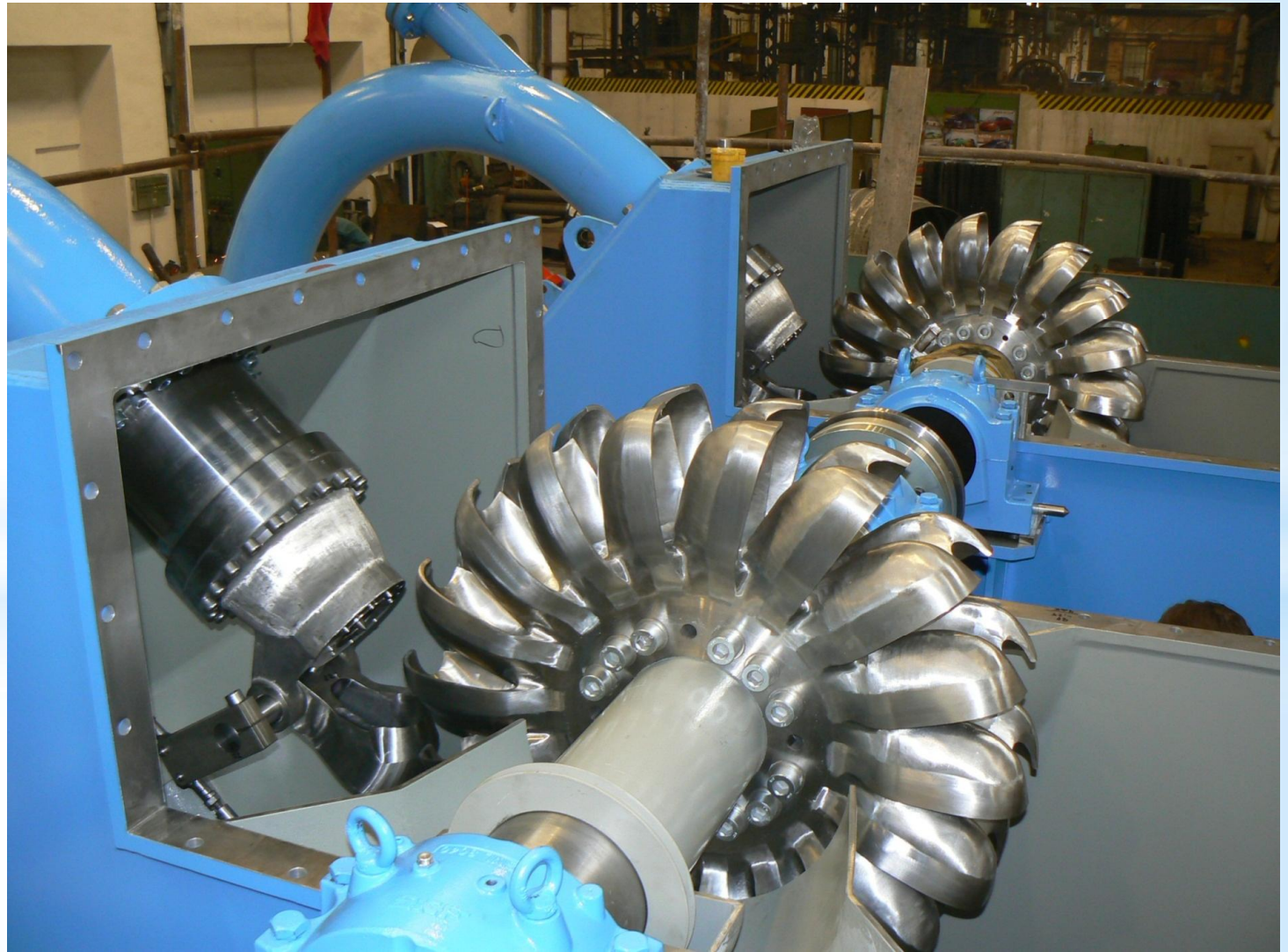
3. Famille des  
Turbomachines

**Turbine  
hydraulique**

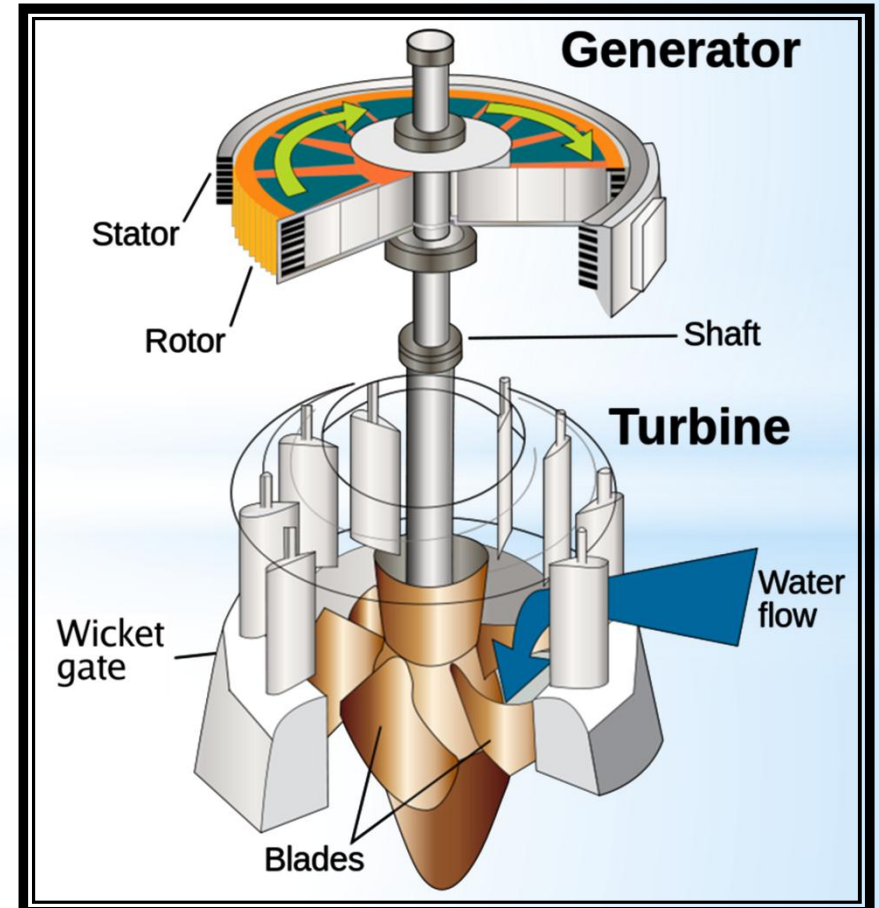


### 3. Famille des Turbomachines

## Turbine hydraulique



### 3. Famille des Turbomachines



### 3. Famille des Turbomachines

## Turbine a vapeur

La turbine à vapeur est une turbomachine motrice transformant en énergie mécanique l'énergie contenue dans la vapeur d'eau sous la forme sous la forme d'énergie thermique et de pression.

La somme de ces deux formes d'énergie, exprimée en kcal par kg de vapeur, est caractérisée par l'enthalpie, fonction de la température et de la pression.

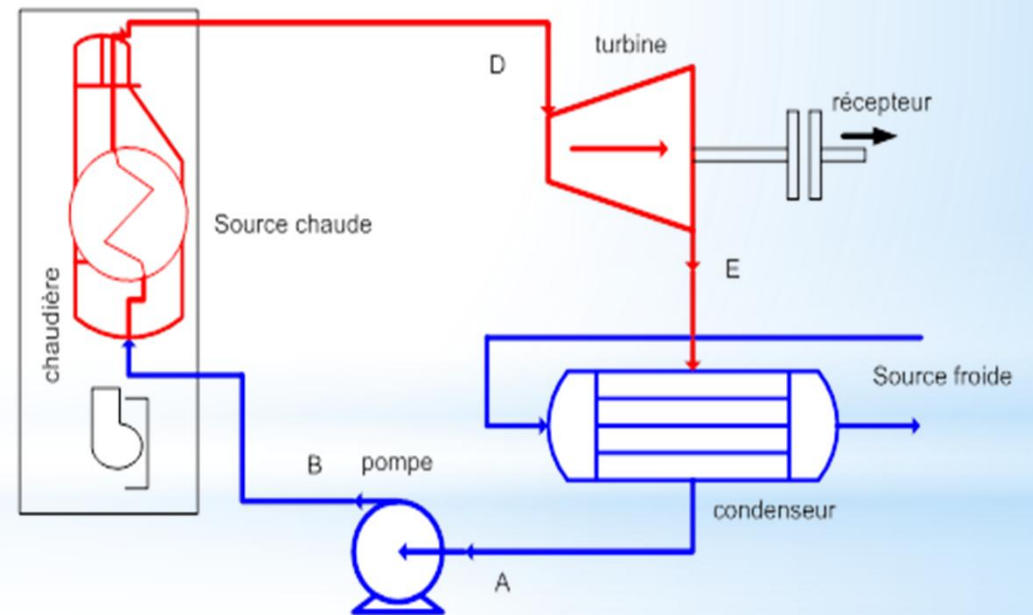
En créant une différence de pression et une chute de température on réalise une chute d'enthalpie entre la source chaude (générateur de vapeur) et la source froide (condenseur).

La turbine placée entre ces deux sources assure la transformation en énergie de rotation avec le minimum possible de pertes.



### 3. Famille des Turbomachines

## Turbine a vapeur

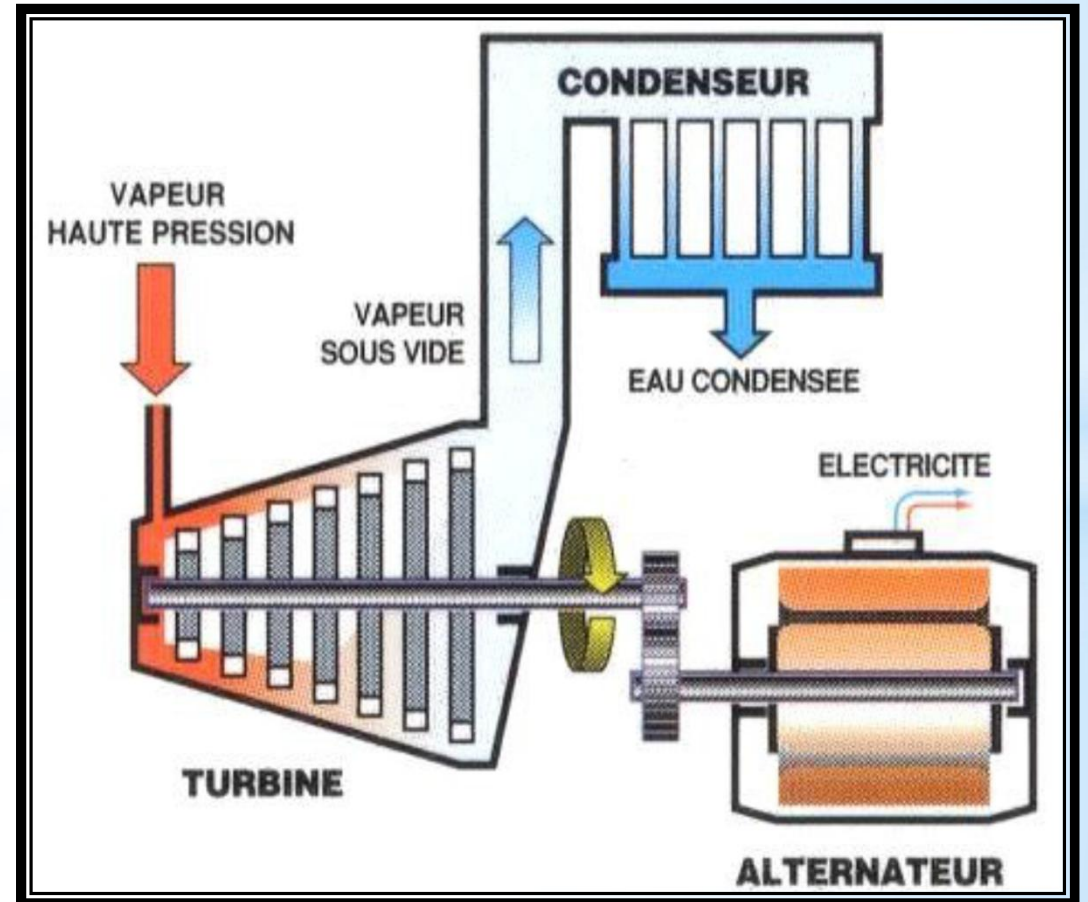


### 3. Famille des Turbomachines

## Turbine a vapeur

Turbines à condensation

Turbines à condensation : la pression de sortie est très faible, la vapeur retourne directement au condenseur.

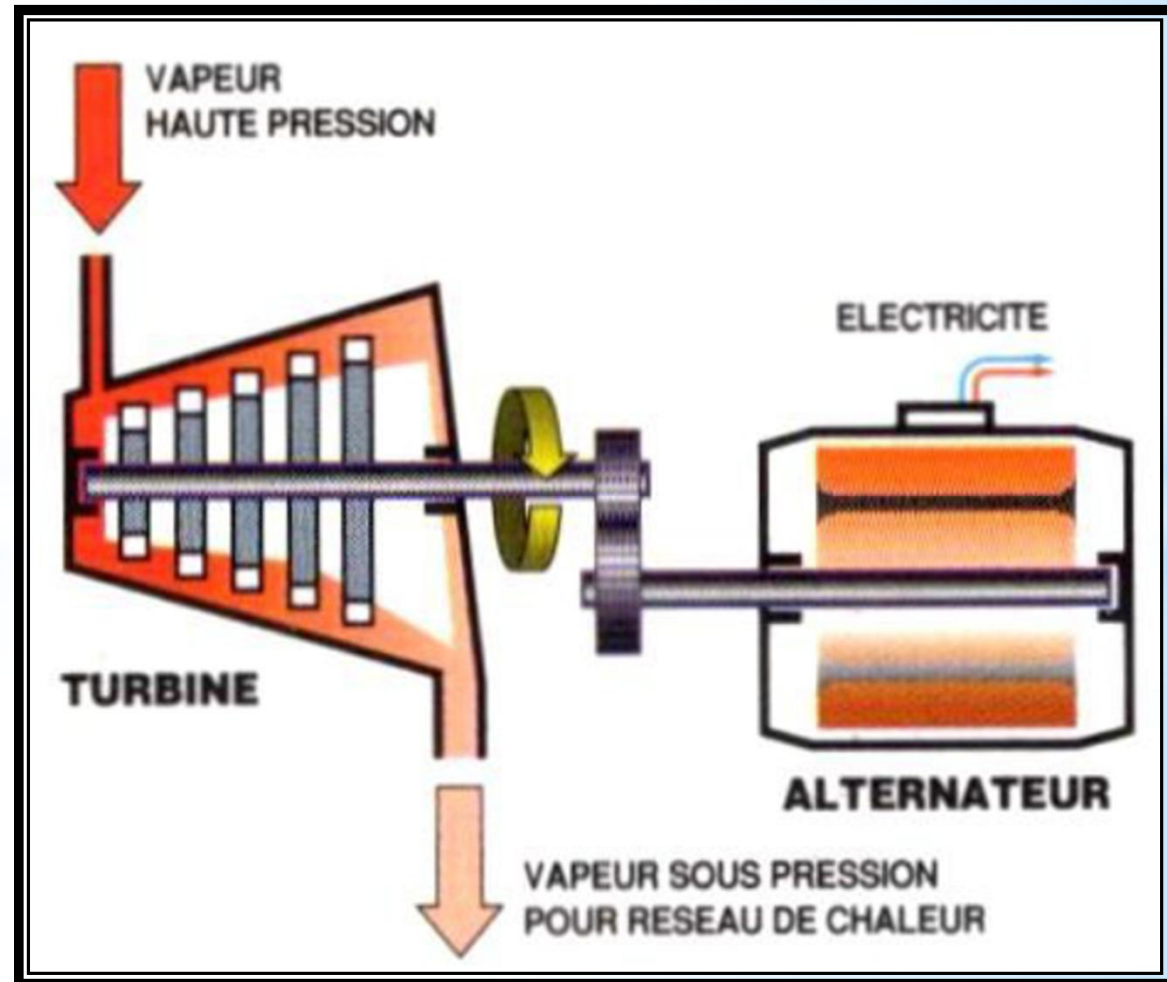


### 3. Famille des Turbomachines

## Turbine a vapeur

Turbines à contrepression

Turbines à contre-pression : la pression en fin de détente à l'aval de la turbine est suffisante pour être utilisée dans une installation annexe.

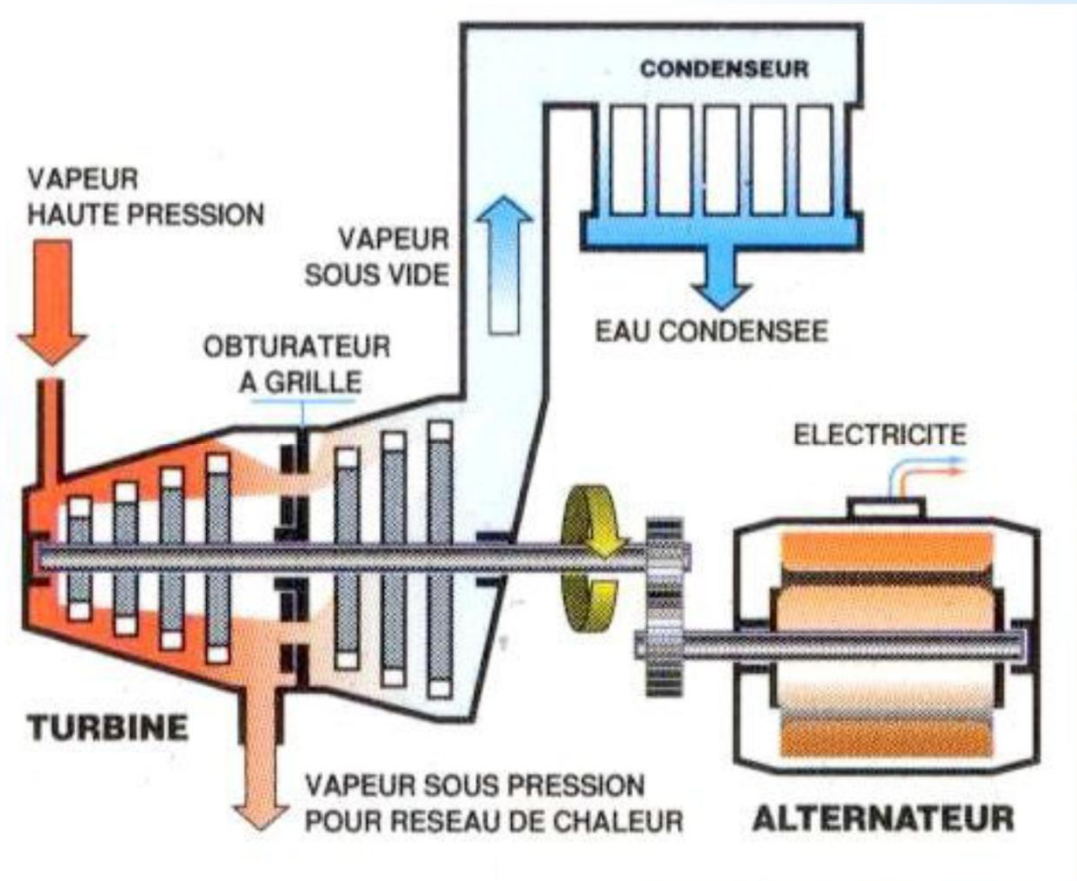


### 3. Famille des Turbomachines

## Turbine a vapeur

### Turbines à soutirage

Turbines à soutirage : soutirage d'une partie de la vapeur en cours de détente, le reste continue de fournir du travail dans les étages suivants et retourne au condenseur. Cette technique permet d'améliorer le rendement d'une installation.



### 3. Famille des Turbomachines

**Turbine a gaz**

**TURBO - JET**

**Turbine a gaz**

**HISPANO-SUIZA**

3. Famille des  
Turbomachines

### 3. Famille des Turbomachines

**HISPANO-SUIZA**

**Turbine a gaz**

### 3. Famille des Turbomachines

**HISPANO-SUIZA**

**Turbine a gaz**



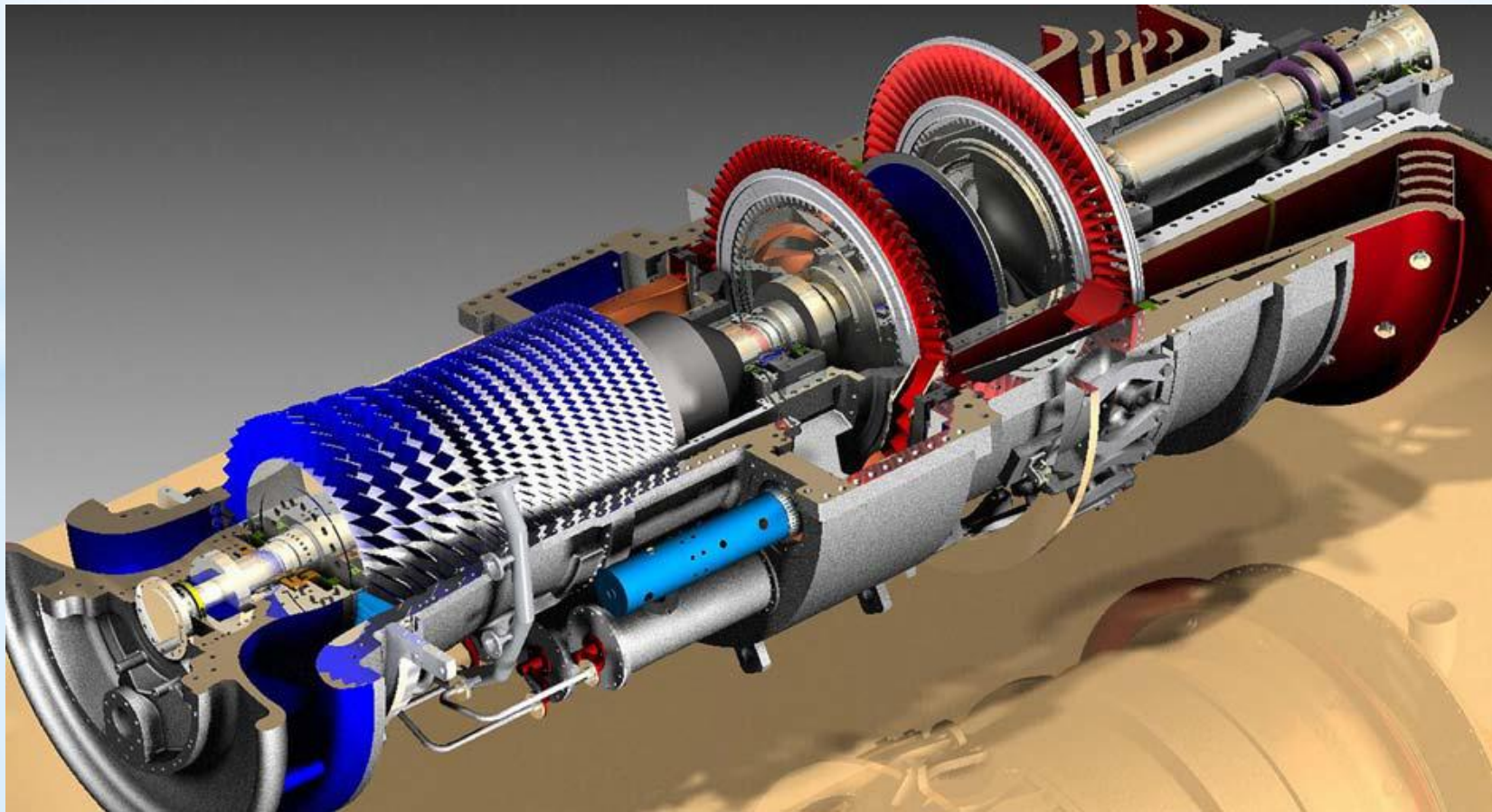
### 3. Famille des Turbomachines

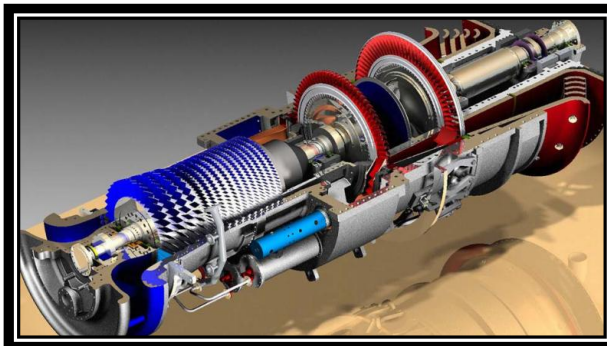
**T-Shaft**

**Turbine a gaz**

### 3. Famille des Turbomachines

# ***TURBINE A GAZ*** ***MS 5002 C LHE***





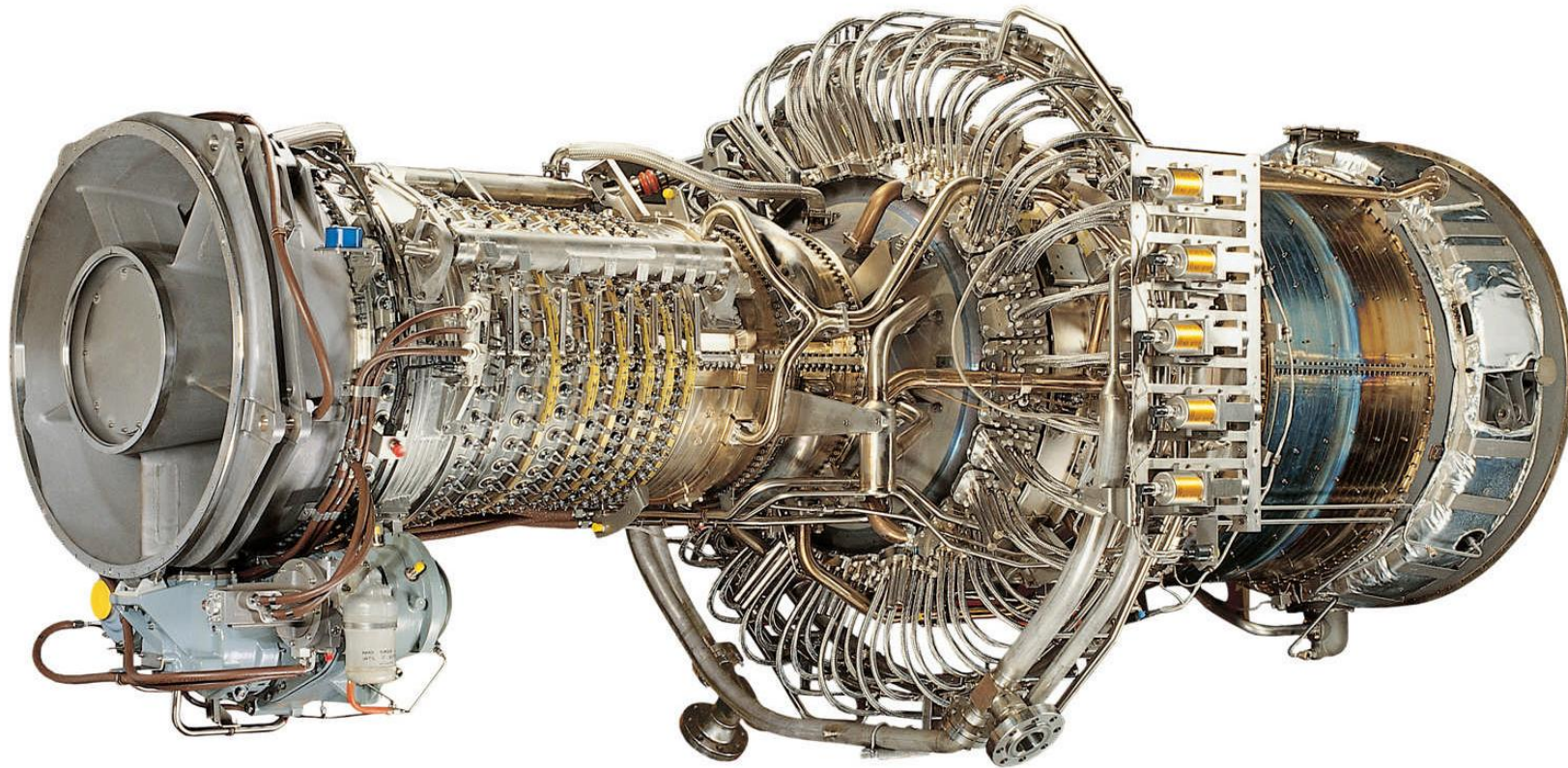
### 3. Famille des Turbomachines

***TURBINE A GAZ***  
***MS 5002 C LHE***

En pratique

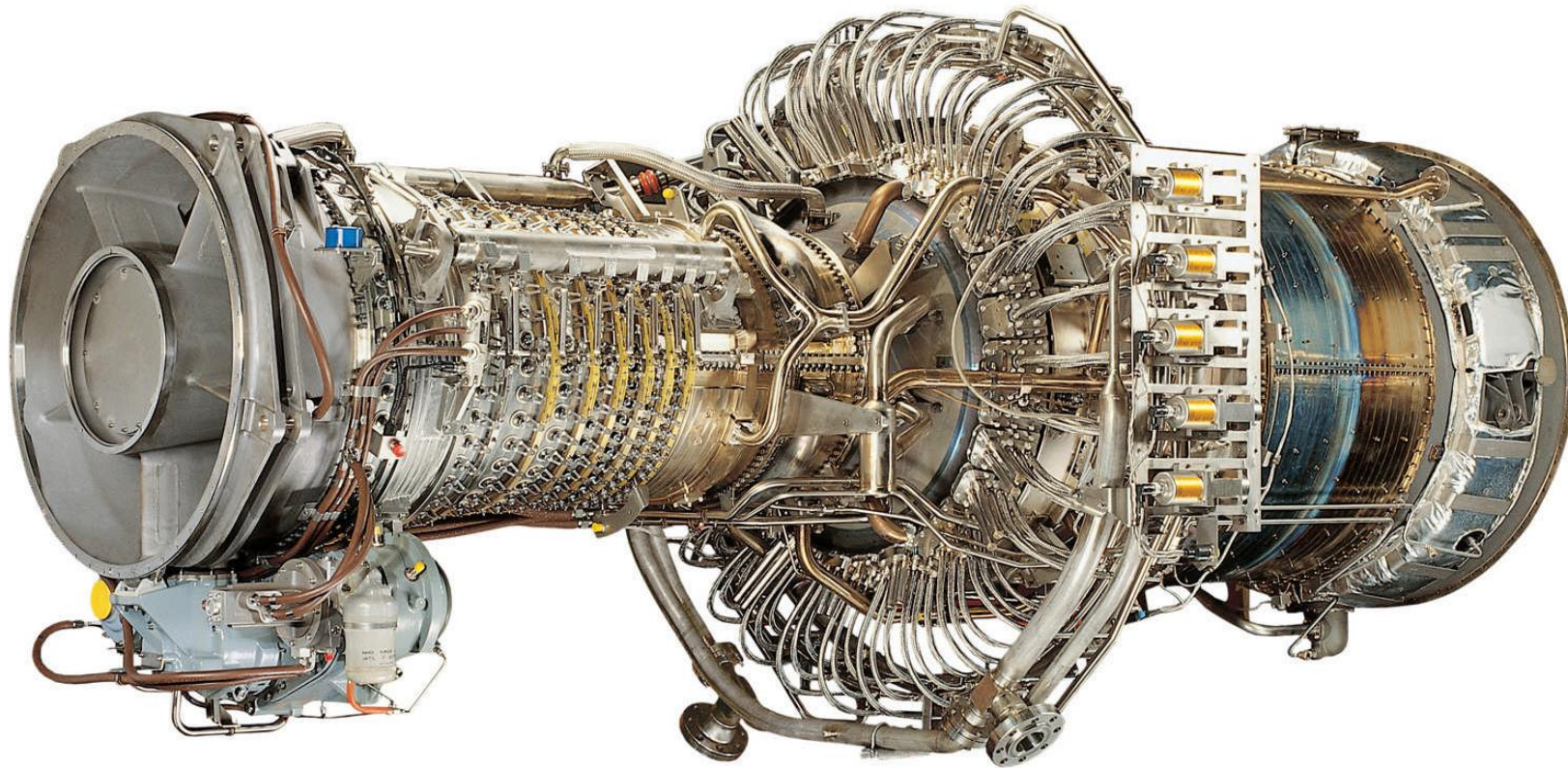
### 3. Famille des Turbomachines

## PGT25-PGT25+ Gas Turbines



### 3. Famille des Turbomachines

## PGT25-PGT25+ Gas Turbines



# 3. Famille des Turbomachines



### 3. Famille des Turbomachines



### 3. Famille des Turbomachines

Compresseur

Centrifuge

Alternative

axiale

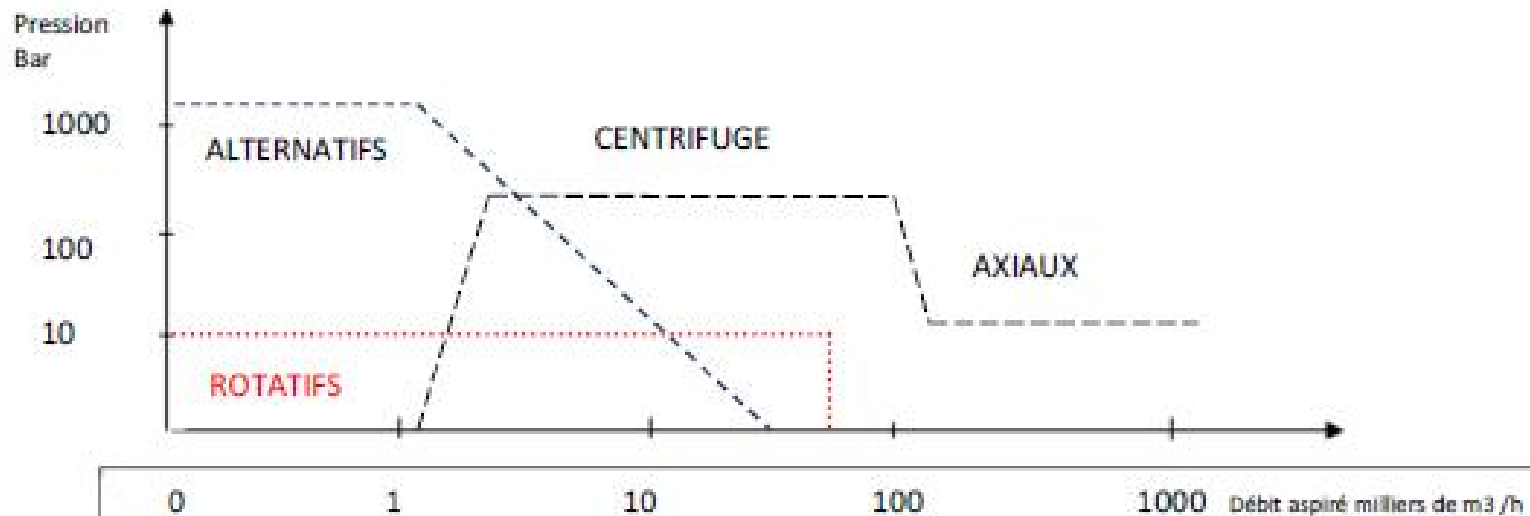


Figure 4.7 choix des compresseurs



### 3. Famille des Turbomachines

**Compresseur**

**axiale**

### 3. Famille des Turbomachines

**Compresseur**

**Centrifuge**



### 3. Famille des Turbomachines

**Compresseur**

**Centrifuge**

### 3. Famille des Turbomachines

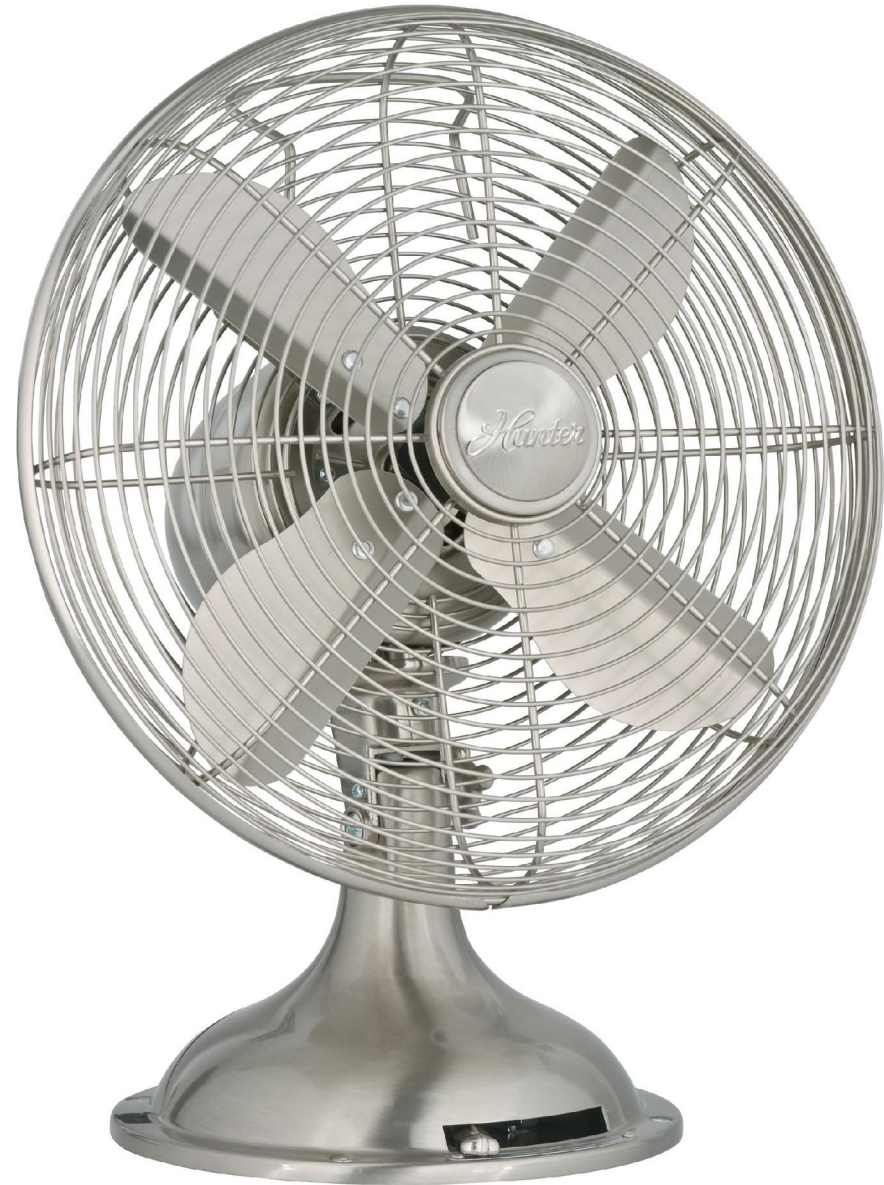
**Compresseur**

**ALTERNATIFS**

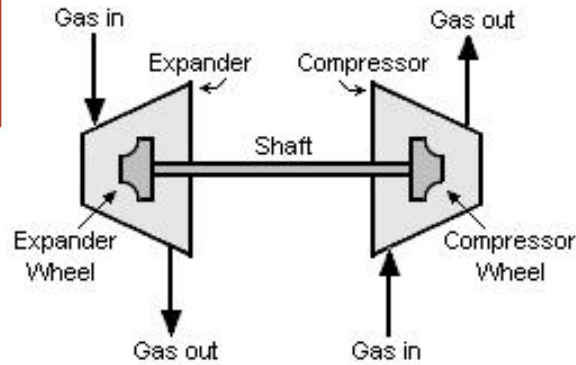


# 3. Famille des Turbomachines

## Les Ventilateurs



# 3. Famille des Turbomachines



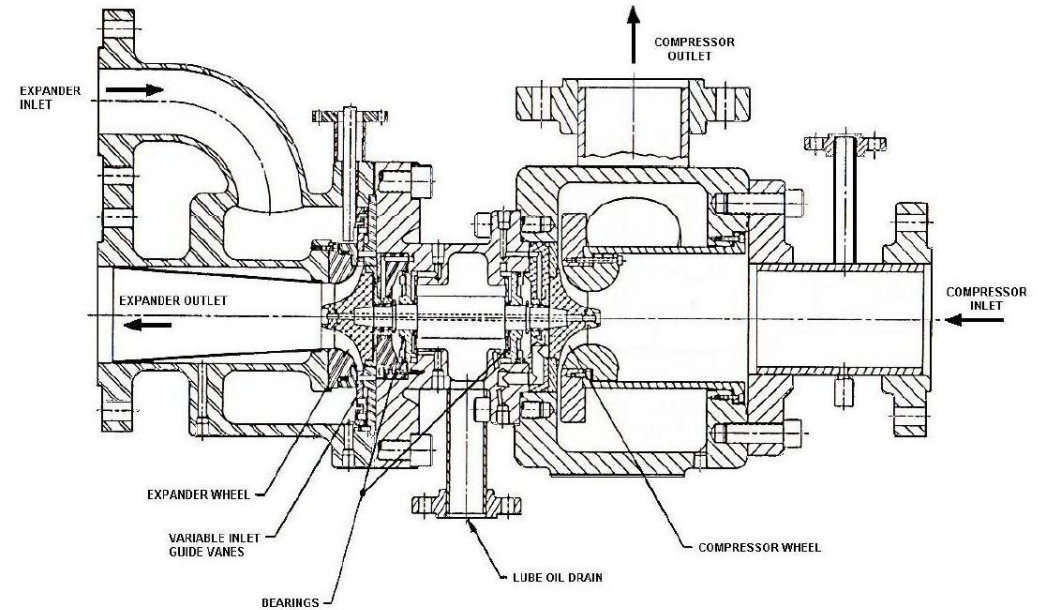
**TURBOEXPANDER**

**Turbine + compresseur**



**FIGURE 1 - TURBOEXPANDER**

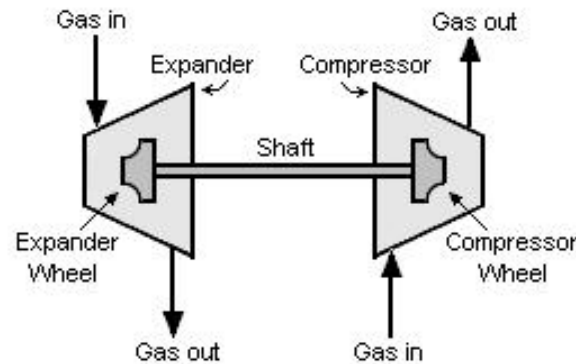
EXPANDER/COMPRESSOR ASSEMBLY  
CROSS-SECTION DWG



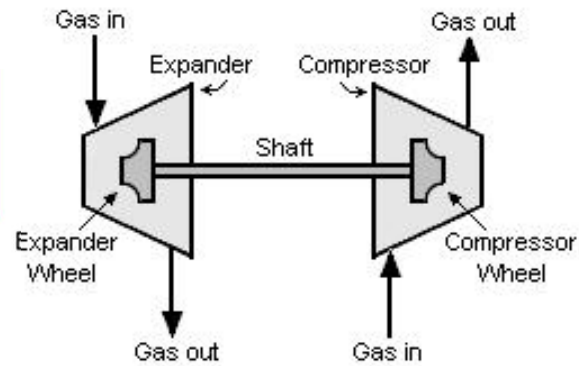
## 2. Classification des Turbomachines

**TURBOEXPANDER**

**Turbine + compresseur**

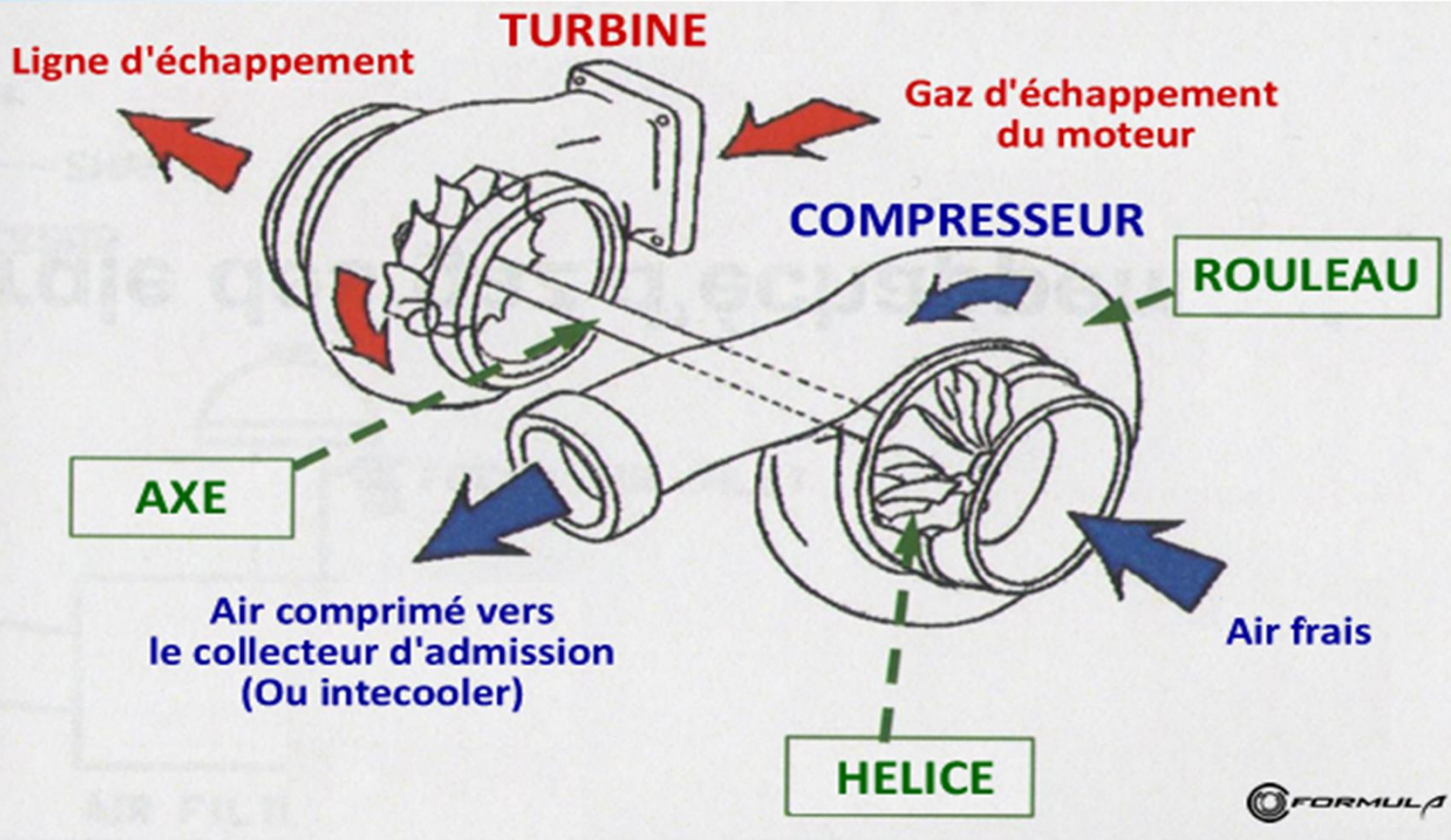


### 3. Famille des Turbomachines



**TURBOCOMPRESSEUR**

**Turbine + compresseur**



**MOTEUR DIESEL**



# 4. Classification des Turbomachines

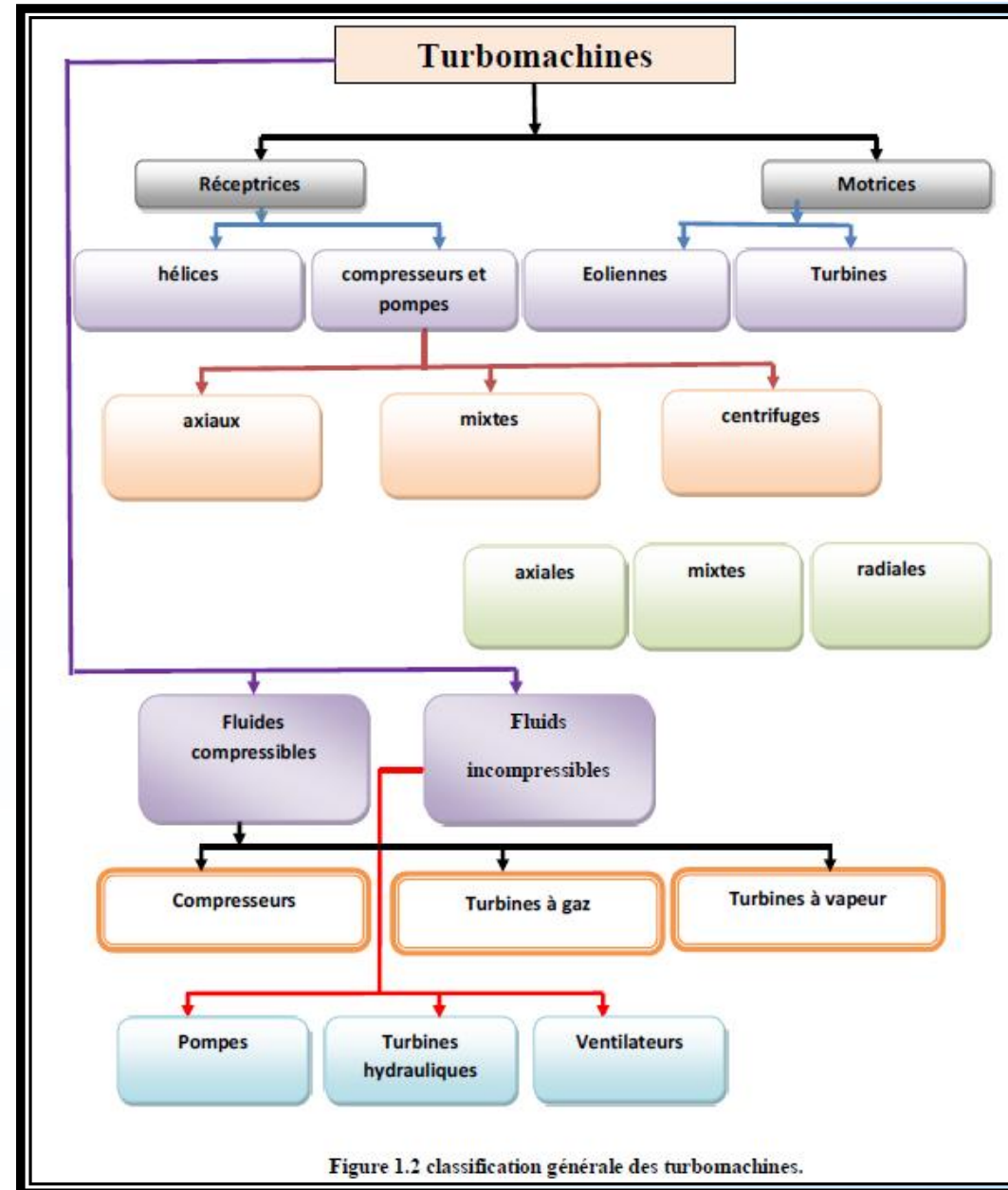


Figure 1.2 classification générale des turbomachines.

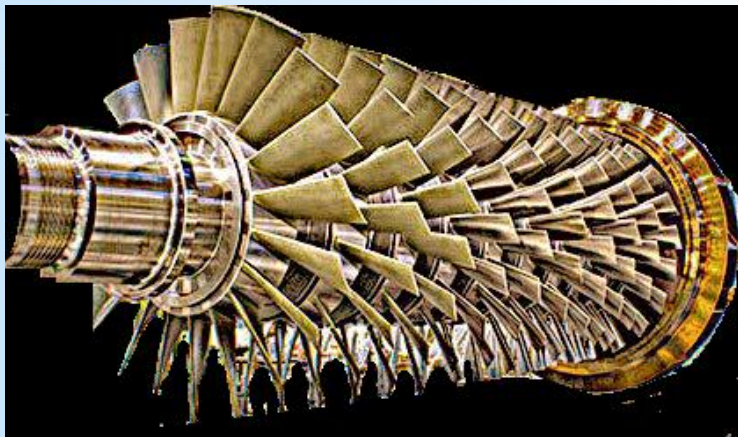
# 4. Classification des Turbomachines

4.1 Selon le sens du transfert d'énergie : On divise alors les turbomachines en deux catégories principales

Les turbomachines qui fournissent de l'énergie au fluide (enthalpie). Dans ce groupe on trouve les compresseurs, les ventilateurs et les pompes



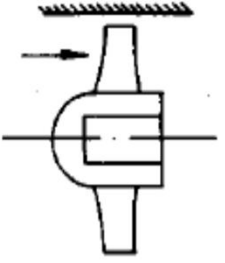





Les turbomachines des quelles on retire de l'énergie du fluide pour l'utiliser comme un travail mécanique. Dans ce cas, on parle alors de turbines.



# 4. Classification des Turbomachines

4.2 Selon la direction principale de l'écoulement par rapport à l'axe de rotation de la machine : Selon ce critère on a

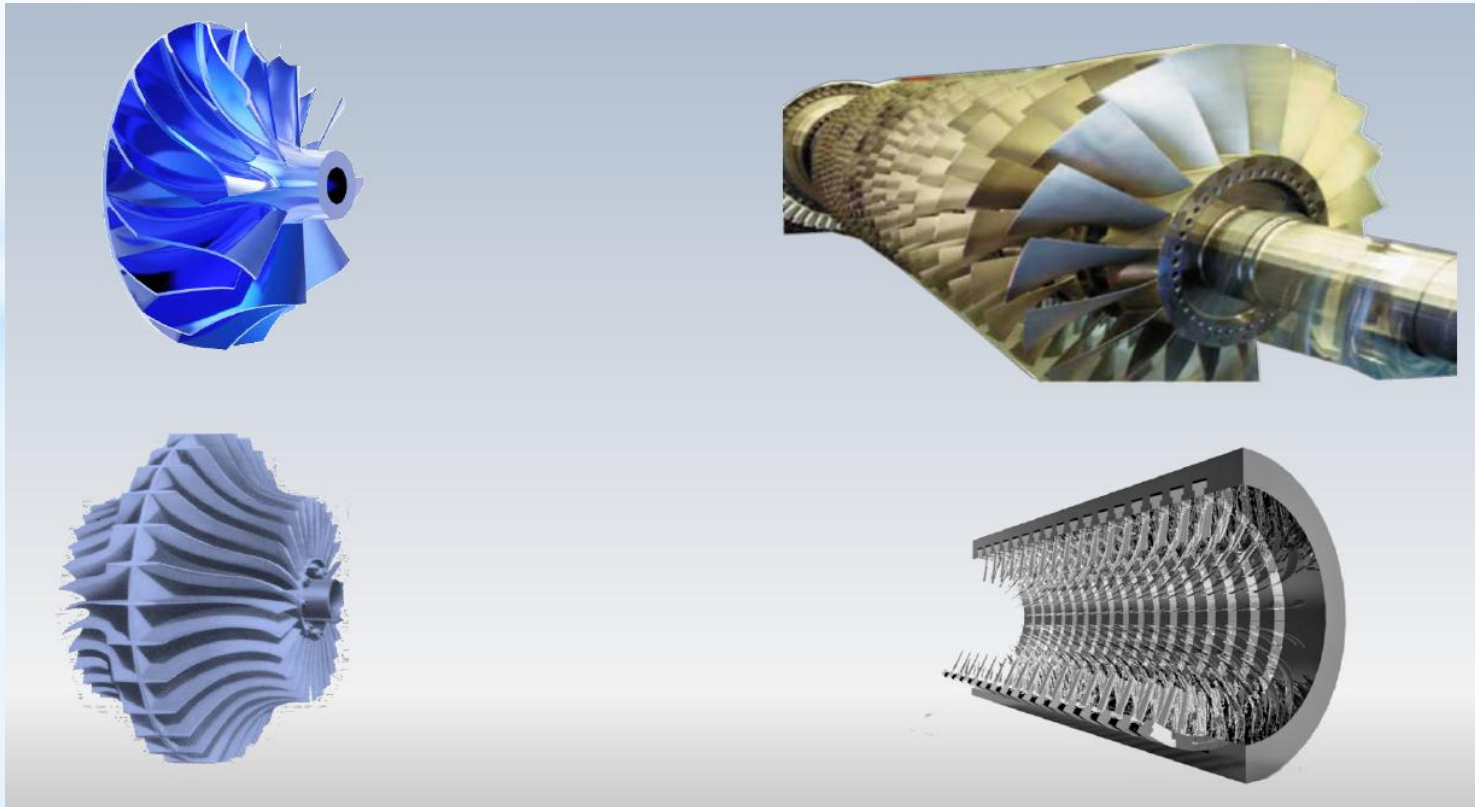
- Les turbomachines axiales dans lesquelles la direction de l'écoulement est parallèle à l'axe de rotation de la machine ;
- Les turbomachines radiales ou centrifuges dans lesquelles une partie importante de l'écoulement à l'entrée ou à la sortie est dans la direction normale à l'axe de rotation ou radiale ;
- Les turbomachines mixtes (Hélicoïdale) dans lesquelles la direction de l'écoulement, à l'entrée ou à la sortie, comporte de composantes axiales et radiales.

Axiale	Radiale ou centrifuge	Hélicoïdale
		
		

## 4. Classification des Turbomachines

**radiale**

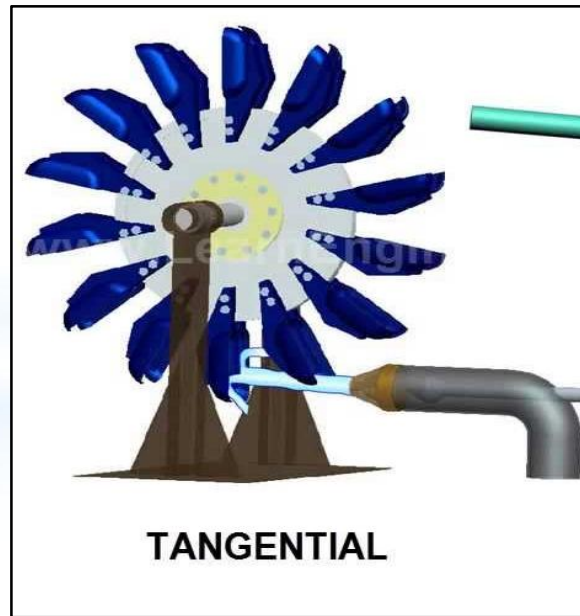
**axiale**



# 4. Classification des Turbomachines

- les turbomachines à impulsion ou à action dans lesquelles le fluide subit seulement un changement d'impulsion lors du passage dans le rotor sans aucune variation de pression ;
- les turbomachines à réaction dans lesquelles l'échange énergétique entre le fluide et le rotor entraîne une chute de pression sans aucune variation de vitesse ;
- les turbomachines de type combiné dans lesquelles le fluide subit un changement de pression et de vitesse lors de son passage par le rotor.

4.3 Selon la nature du transfert énergétique : En particulier on trouve



turbine à impulsion



turbine à réaction

## 4. Classification des Turbomachines

### 4.4 Selon le type d'installation : On distingue deux types



- les turbomachines encastrées telles que les pompes centrifuges, les turbines à gaz etc., où le fluide circule à l'intérieur de conduits ;

- les turbomachines en veine libre telles que les éoliennes, les hélices d'avion ou de navire.

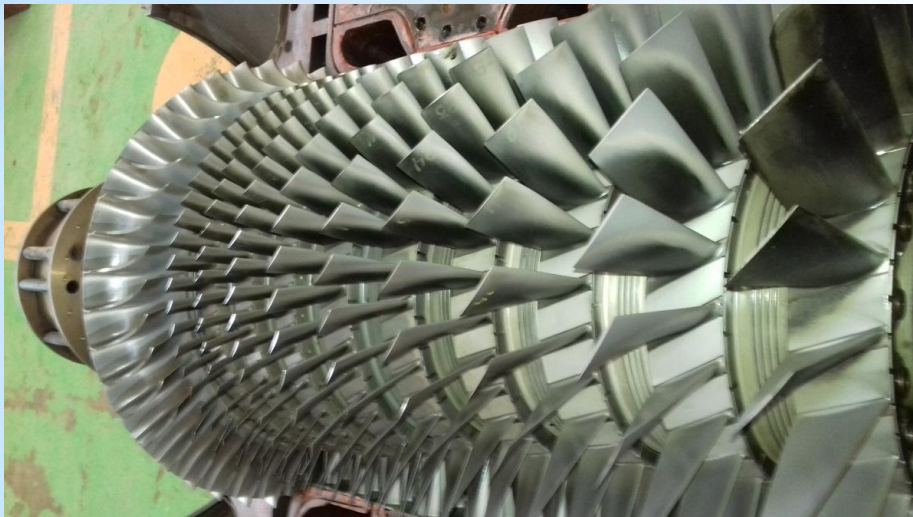


## 4. Classification des Turbomachines

### 4.5 Selon la nature du fluide : Le fluide peut être compressible ou incompressible

- Le fluide compressible subit des variations dans sa masse volumique dont il faut tenir compte surtout si elles sont importantes.

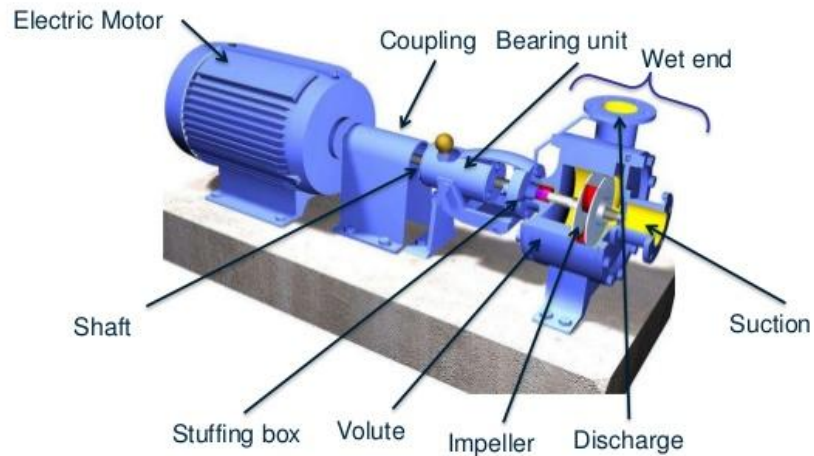
- Le fluide incompressible ne subit presque aucune variation dans sa masse volumique.



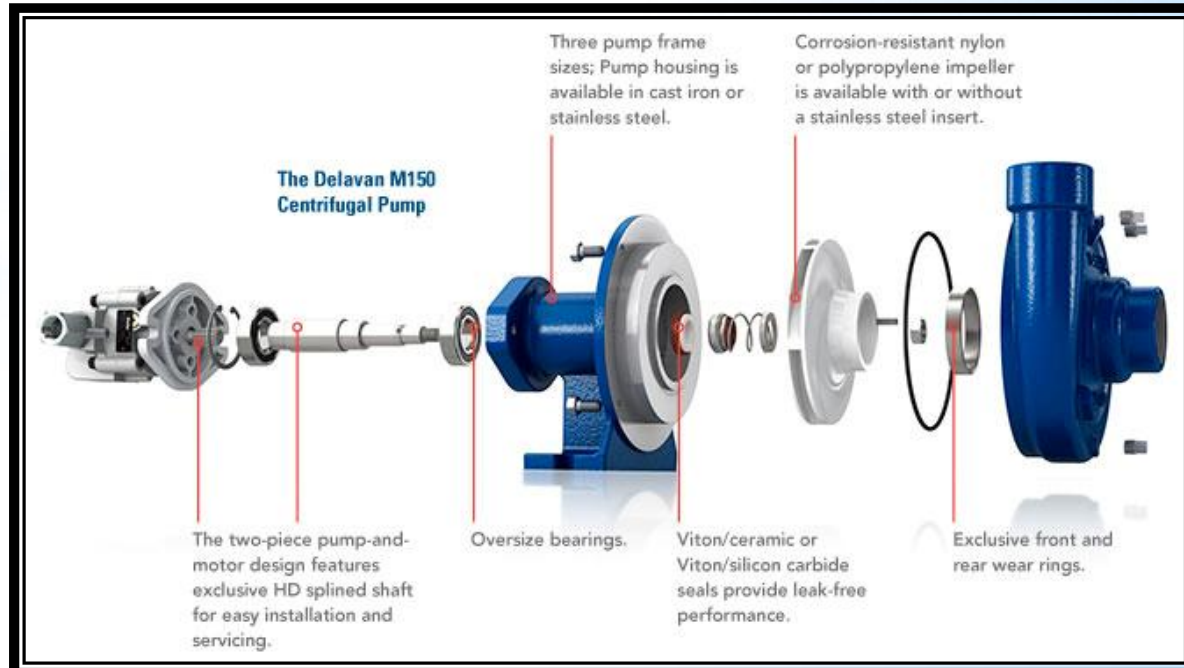
## 5. Construction des turbomachines

## Pompes centrifuges

### Construction of a Centrifugal Pump



tenova  
BATESMAN  
TECHNOLOGIES





## 5. Construction des turbomachines



## Pompes centrifuges



## 5. Construction des turbomachines

### **Turbine a gaz**

## 5. Construction des turbomachines



## 5. Construction des turbomachines

### Turbine a gaz

#### Rôle

Sur un turboréacteur la turbine récupère une partie de l'énergie issue de la combustion des gaz pour le fonctionnement de la soufflante, du compresseur et des accessoires.

Sur un turbopropulseur la turbine récupère la quasi totalité de l'énergie issue de la combustion des gaz pour entraîner l'arbre de transmission de l'hélice, le compresseur et les accessoires.

Comme pour les compresseurs il existe deux sortes de turbines:

- les turbines centripèdes très peu utilisées et uniquement pour les réacteurs de faibles puissances.
- les turbines axiales solution utilisée sur la majorité des turboréacteurs et turbopropulseurs.

Rappelons que sur un turboréacteur double flux la turbine BP (haute pression) entraîne le compresseur HP et la turbine B P (basse pression) entraîne le compresseur BP et la soufflante FAN.

#### Principe de fonctionnement

Sortant de la chambre de combustion les gaz vont se détendre dans le distributeur (stator). Celui-ci va accélérer l'écoulement en le déviant. Sous l'effet de cet écoulement le rotor ayant aussi des profils déviateurs tourne.

Figure ci-dessous:

La vitesse  $V_1$  à la sortie de la chambre de combustion est déviée et accélérée dans les aubes du distributeur (stator) pour devenir à la sortie  $V_2$ .

A l'entrée du rotor la vitesse absolue d'entrée  $V_2$  peut être décomposée en  $V_3$  vitesse relative d'entrée et  $u$  vitesse de rotation.

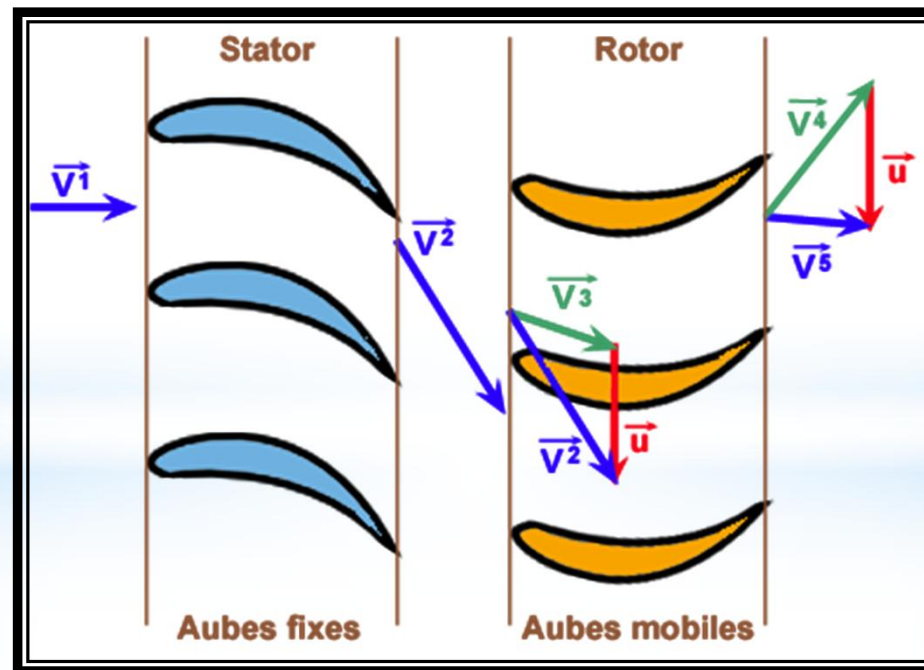
A la sortie du rotor la vitesse absolue de sortie  $V_5$  peut aussi se décomposer en  $V_4$  vitesse relative de sortie et  $u$  vitesse de rotation.

Il y a accélération de la vitesse dans le distributeur (aubage fixe) et ralentissement dans le rotor (aubage mobile).

Une partie de l'énergie cinétique est donc transformée en énergie mécanique pour faire tourner le rotor.

## 5. Construction des turbomachines

### Turbine a gaz

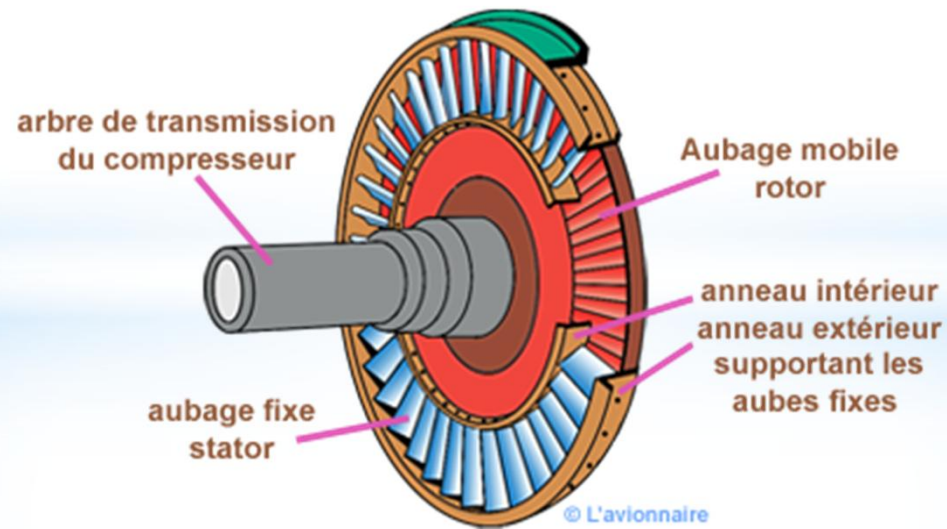


## 5. Construction des turbomachines

### Turbine a gaz

#### Composition

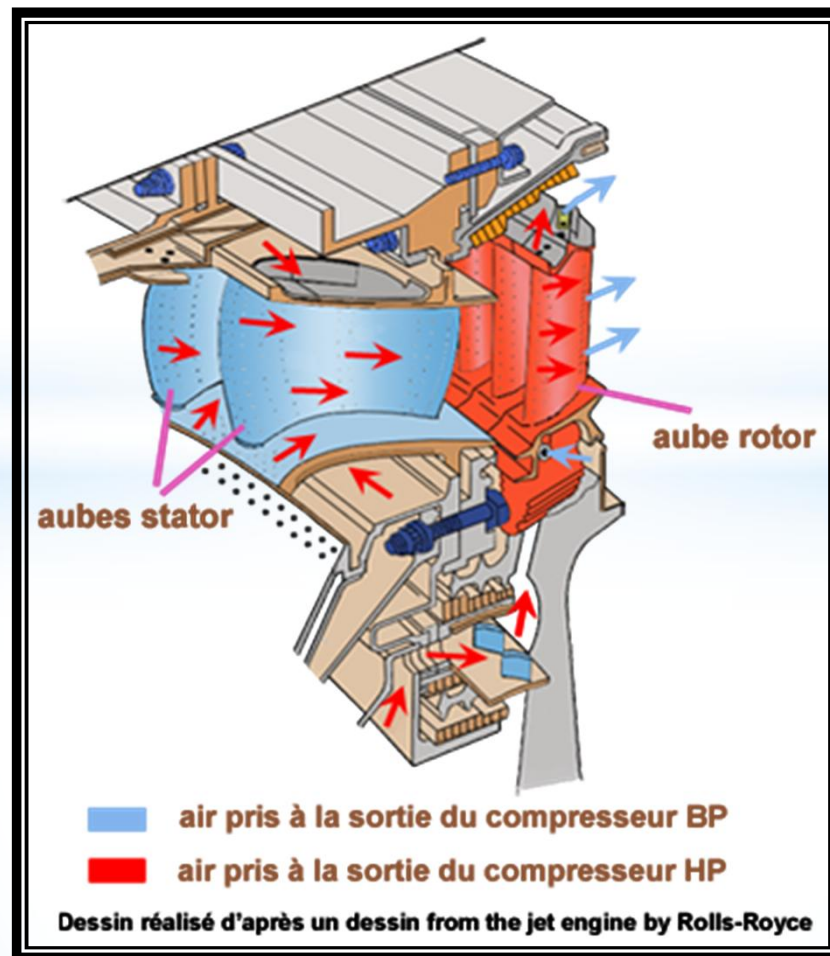
Un étage de turbine est constitué d'un aubage fixe distributeur ou stator, suivi d'un aubage mobile ou rotor.



## 5. Construction des turbomachines

### Turbine a gaz

Une turbine HP ou BP peut comporter un ou plusieurs étages selon les besoins en énergie.  
Ci-dessous principe de refroidissement d'un étage de turbine.



## 5. Construction des turbomachines

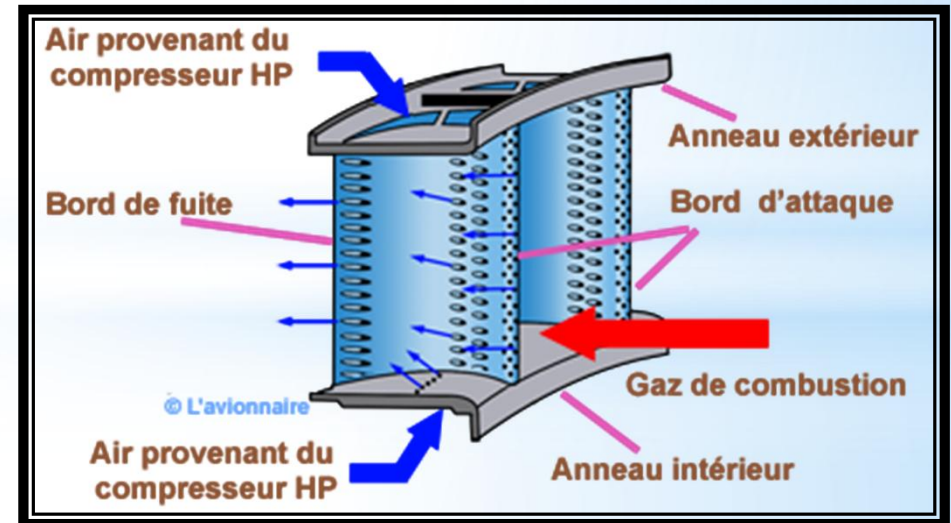
### Turbine a gaz

#### Le stator ou distributeur

Le distributeur est constitué par des aubes directrices maintenues par un anneau intérieur et un anneau extérieur (voir dessin ci-dessus) ou par deux demi-carters.

Son rôle est de diriger l'écoulement des gaz sortant de la chambre de combustion sur les aubes de rotor de la turbine. Pour les turbines à plusieurs étages, chaque distributeur est intercalé entre les rotors de la turbine pour "redresser" les filets d'air.

Ces aubes directrices étant exposées aux gaz chauds de combustion, il est donc nécessaire de les refroidir pour atténuer les contraintes thermiques. Le système de refroidissement peut varier d'un motoriste à un autre, mais le principe général reste le même. L'air provenant du compresseur HP (environ 500°) pénètre à l'intérieur de l'aube puis s'échappe à travers des trous au niveau du bord d'attaque et du bord de fuite.

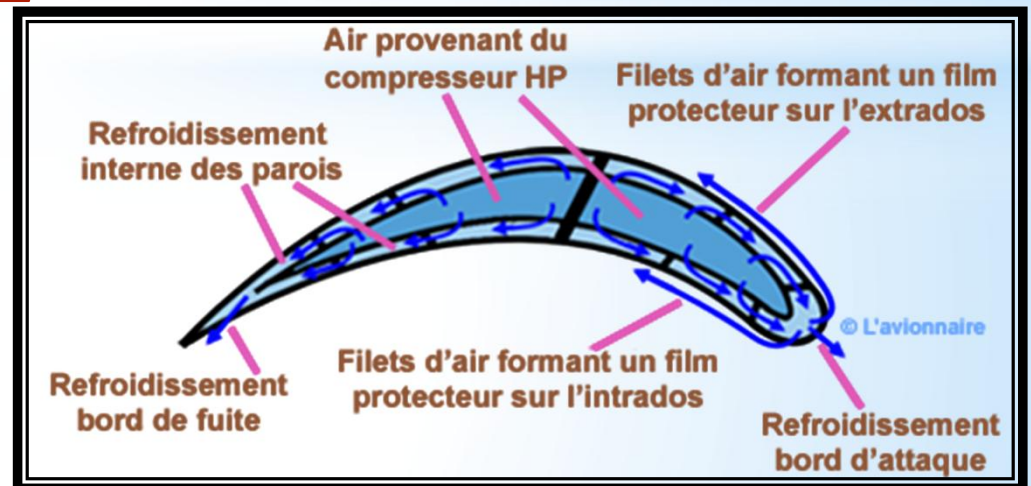




## 5. Construction des turbomachines

### Turbine a gaz

L'aube directrice est pourvue d'une cloison interne qui épouse sa forme. Des trous répartis sur cette cloison vont permettre à l'air de refroidir la paroi interne de l'aube. Après avoir refroidi les surfaces internes, l'air s'échappe par des trous sur le bord d'attaque afin de le refroidir. Une rangée de trous disposée de chaque côté du bord d'attaque permet de refroidir l'intrados et l'extrados par recouvrement de film. Une autre rangée de trous disposée sur le bord de fuite en assure son refroidissement par convection.



## 5. Construction des turbomachines

### Turbine a gaz

Le rotor

Les ailettes rotoriques sont fixées sur un moyeu ou disque ( ci-dessous à gauche) par divers systèmes d'attache dont certains très complexes en forme de pied de sapin.

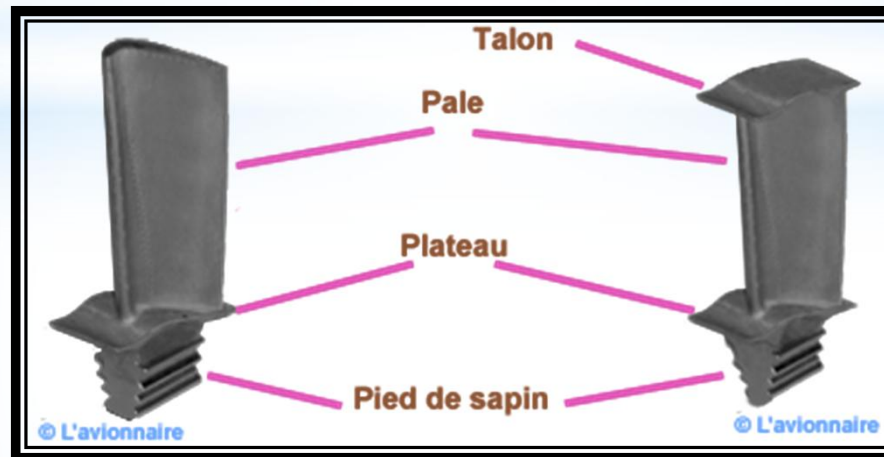


## 5. Construction des turbomachines

### Turbine a gaz

#### Détail des ailettes

Ci-dessous deux sortes d'ailettes avec pied de sapin. A droite l'ailette porte un talon. L'ensemble de ces talons forment une couronne. Face à cette couronne est fixé sur l'anneau extérieur ou les demi-carters un joint abradable, ce qui permet d'améliorer l'étanchéité et donc d'augmenter le rendement de la turbine.

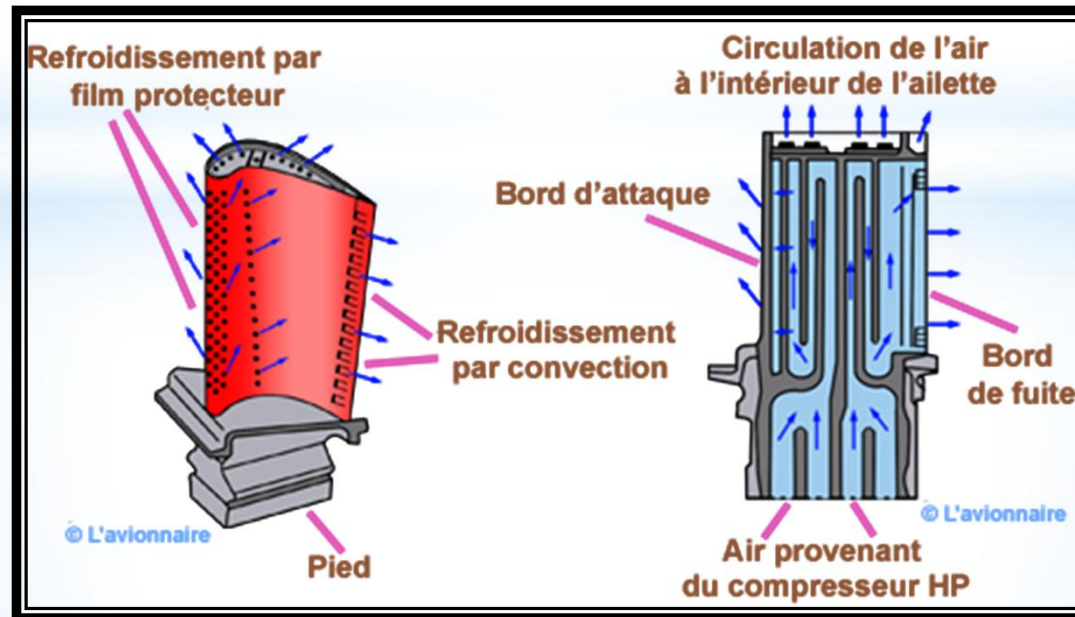


## 5. Construction des turbomachines

### Turbine a gaz

#### Refroidissement des ailettes

Comme les aubes directrices les ailettes de turbines sont exposées aux gaz chauds de combustion, il est donc nécessaire de les refroidir. Le principe est le même que pour les aubes directrices. De l'air provenant du compresseur HP pénètre à l'intérieur de l'ailette puis s'échappe par le bord d'attaque en créant un refroidissement par film protecteur sur l'extrados et l'intrados, et par convection sur le bord de fuite.



## 5. Construction des turbomachines

### Palier

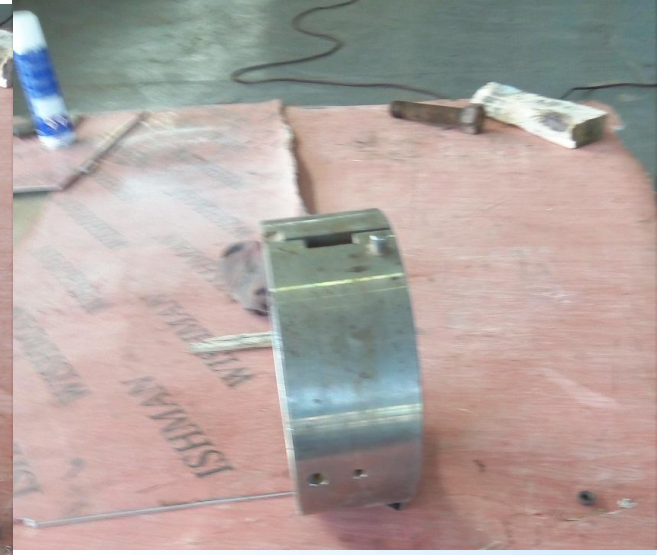
Les arbres de transmission sont supportés et guidés par des organes mécaniques appelés paliers (généralement à roulements à billes ou à rouleaux) qui sont logés dans des chambres-palier pressurisées. Celles-ci sont maintenues par des bras fixés au carter du moteur.

Ces chambres de lubrification permettent de contenir l'huile qui est injectée par une pompe au niveau des paliers pour en assurer la lubrification et comprennent des joints d'étanchéité. Ces chambres sont elles-même situées dans une zone du turboréacteur qui est normalement en surpression par rapport à la pression atmosphérique. Cette surpression produite par le compresseur du turboréacteur permet que le liquide de lubrification tel que de l'huile qui est introduit dans la chambre de lubrification par le circuit d'alimentation reste confiné dans cette chambre du fait de la différence de pression.

Une pompe de récupération permet par l'intermédiaire d'un conduit de récupérer le liquide de lubrification mélangé à l'air et de l'acheminer jusqu'à un séparateur liquide de lubrification-air, après l'avoir refroidi dans un dispositif de refroidissement approprié. A la sortie du séparateur, le liquide de lubrification est ramené dans le réservoir, alors que l'air est évacué directement à l'extérieur par un orifice d'échappement.

## 5. Construction des turbomachines

## Palier



## 5. Construction des turbomachines

### Palier



5. Construction des  
turbomachines

Palier



5. Construction des  
turbomachines

Palier

5. Construction des  
turbomachines

Palier

## 5. Construction des turbomachines

# Chambre de combustion

### Les chambres de combustion

La chambre de combustion est destinée à chauffer l'air qui sort du dernier étage du compresseur HP afin de lui apporter l'énergie nécessaire à faire mouvoir la ou les turbines et à donner suffisamment de poussée à la tuyère. Cet apport de chaleur se fait par la combustion de l'oxygène de l'air avec un carburant, du kérosène (hydrocarbure) en l'occurrence. Elle doit être la plus complète possible et la répartition des températures dans les gaz la plus homogène possible. La chambre de combustion située entre le compresseur BP et la turbine HP est constituée d'un tube à flamme ou foyer (généralement) en forme de tore. Celui-ci est enfermé dans un carter, également de forme torique.

### Principe de fonctionnement

Il est bien évident que le principe de fonctionnement varie d'un constructeur à un autre et même d'un réacteur à un autre chez le même constructeur. Mais le principe général de fonctionnement reste relativement identique. L'air qui pénètre dans la chambre de combustion se répartit en plusieurs circuits. Une partie rentre directement dans le tube à flammes et dans l'injecteur pour contribuer à la combustion. Une autre partie contourne le tube à flammes et sert à la fois pour refroidir les parois et pour diluer et mélanger l'écoulement de l'air dans le foyer. A la mise en rotation du réacteur (voir Principe d'une turbine à gaz) le mélange de l'air provenant du compresseur et du carburant injecté par la pompe est enflammé par une bougie (allumeur). Après avoir atteint son régime d'autonomie l'allumage de la bougie est coupé et la flamme s'auto-entretient.

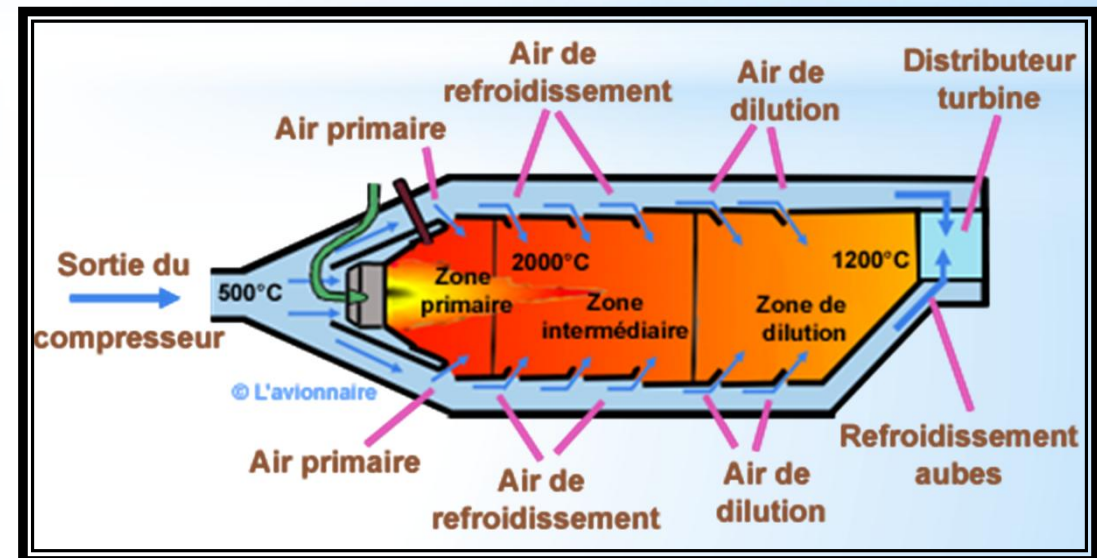
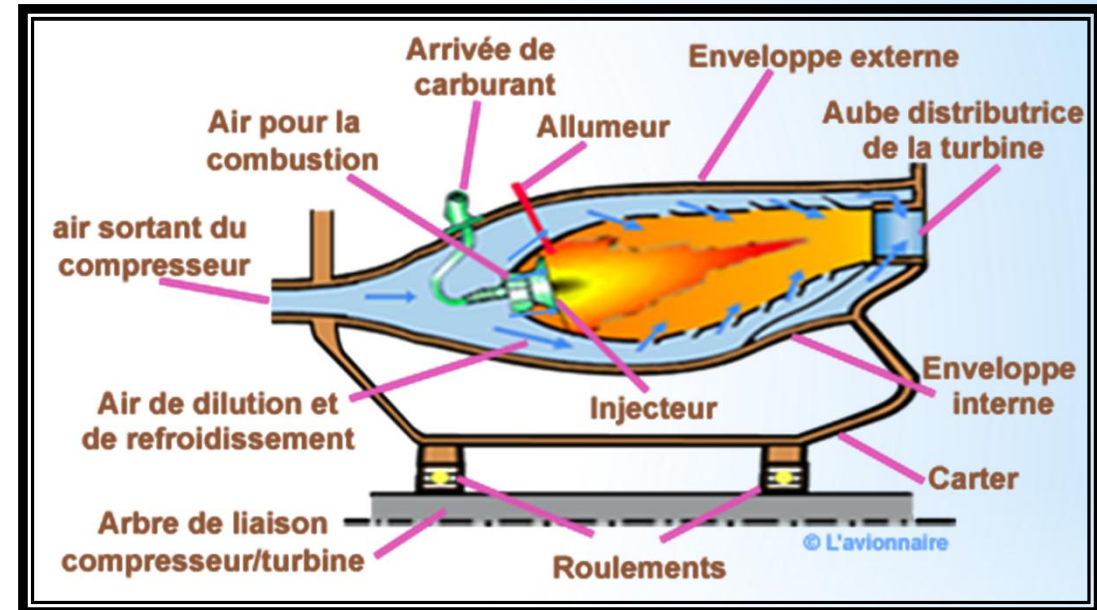
## 5. Construction des turbomachines

### Chambre de combustion

On peut considérer qu'une chambre de combustion peut être partagée en trois zones : une zone primaire, une zone secondaire et une zone de dilution.

La température varie aux alentours de  $2000^{\circ}\text{C}$  dans la zone du primaire pour diminuer aux environs de  $1200^{\circ}\text{C}$  à la sortie de la chambre.

Ces températures élevées nécessitent un refroidissement des parois de la chambre (voir ci-dessus Principe de refroidissement). Celui-ci est obtenu par de l'air sortant du compresseur à environ  $500^{\circ}\text{C}$ .

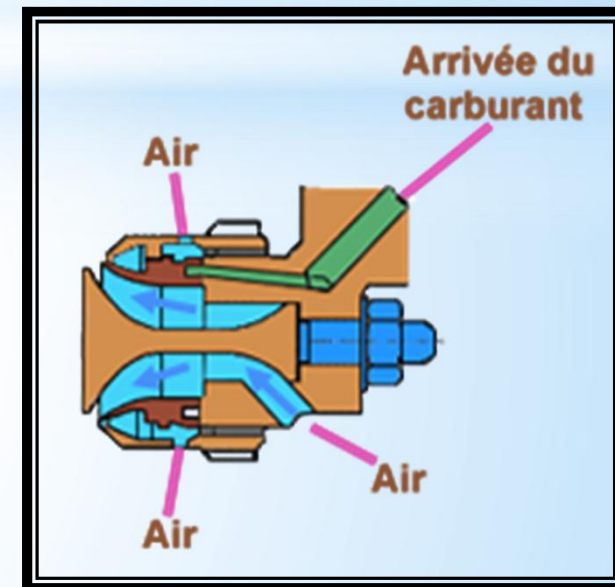


## 5. Construction des turbomachines

### Chambre de combustion

Les injecteurs sont conçus pour fournir un débit de carburant suffisamment pulvérisé pour obtenir un mélange optimal avec l'air. Un injecteur est composé de nombreux éléments pour l'arrivée de l'air et du carburant. Une partie de l'air sert à maintenir la flamme à une distance raisonnable de l'injecteur, une autre partie passe par des vrilles afin de créer un tourbillon pour optimiser le mélange air/carburant et le reste de l'air passe par des trous pour homogénéiser le mélange air/carburant à l'entrée du foyer et créer une recirculation des gaz brûlés et une stabilisation de la flamme.

Ci-dessous dessin d'un injecteur aérodynamique.

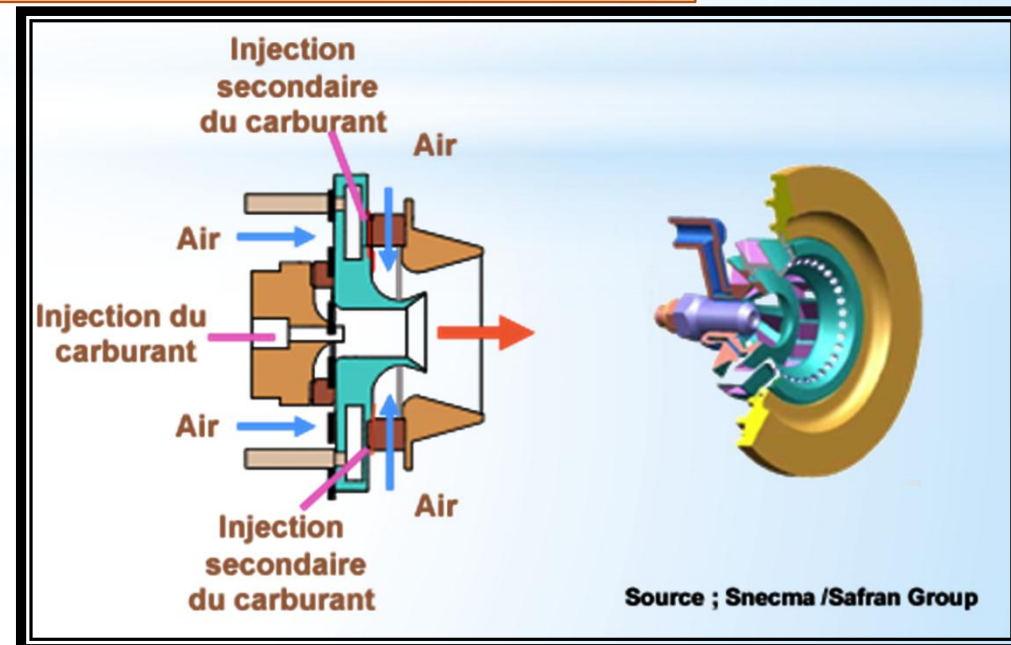


## 5. Construction des turbomachines

### Chambre de combustion

Pour réduire la consommation de carburant et les émissions de polluant (NOx, SOx, suie etc...) l'une des solutions est l'utilisation d'injecteurs LPP (Lean Premixed Prevaporized, ou Pauvre Prémélangé Prévaporisé en français).

- Lean fait référence à la pauvreté du mélange air/carburant par rapport à un mélange normal.
  - Premixed correspond au prémélange entre l'air et le carburant gazeux le plus parfait possible.
  - Prevaporized le carburant liquide injecté doit être entièrement vaporisé avant d'atteindre le front de flamme.
- Ci-dessous dessin d'un injecteur multi-points LPP.



## 5. Construction des turbomachines

Deux types de chambres de combustion sont principalement rencontrées dans le milieu aéronautique pour les turbines à gaz : les chambres séparées réparties autour de l'arbre de liaison compresseur/turbine et les chambres annulaires à l'intérieur desquelles passe l'arbre de liaison compresseur/turbine.

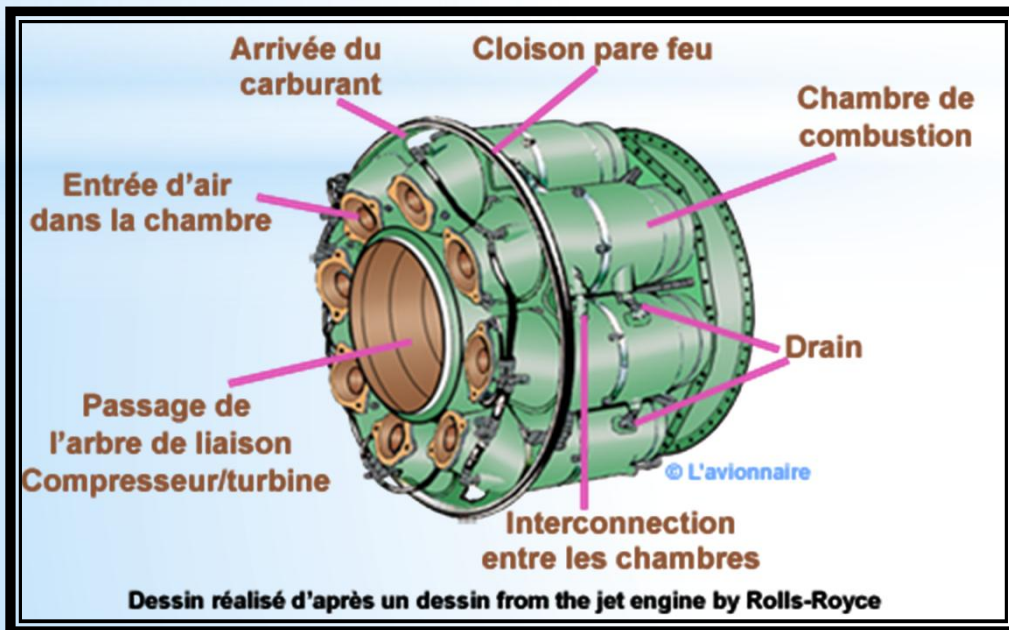
## Chambre de combustion

### Chambres séparées ou tubulaires

Dans les chambres séparées chaque chambre reçoit sa propre alimentation en carburant et en air. L'injecteur est généralement situé au centre de la veine d'air et l'injection s'effectue dans le sens de l'écoulement principal. Le flux total étant l'addition du flux de chaque chambre.

Sur certains types de moteurs les chambres sont interconnectées entre elles. Dessin ci-dessous.

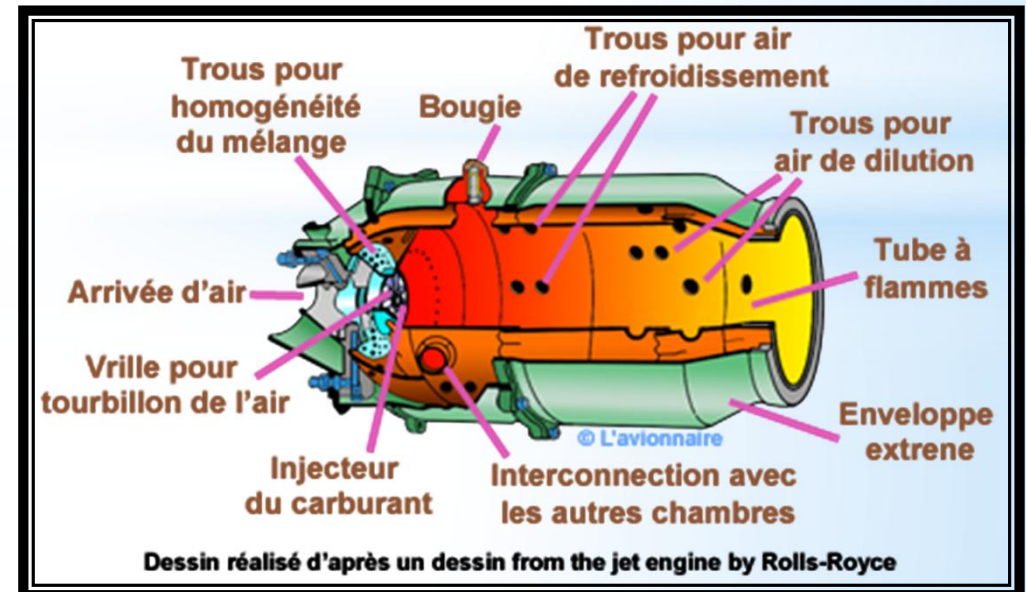
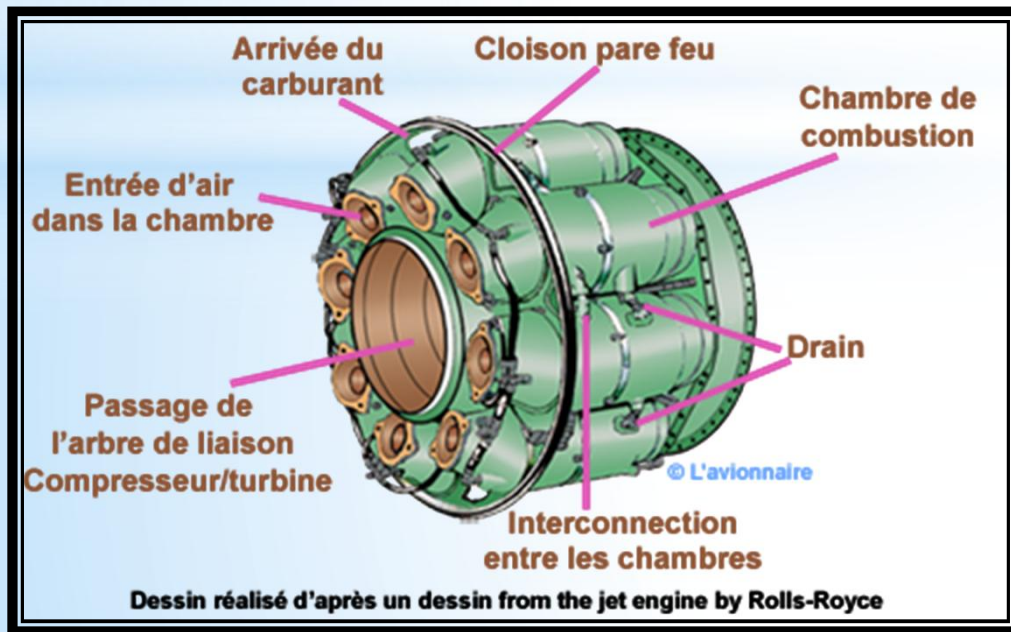
Si la mise au point est facilitée par des débits faibles, les pertes de charges sont plus importantes que sur les chambres annulaires et les contraintes de taille et de poids sont plus élevées.



## 5. Construction des turbomachines

### Chambre de combustion

Ci-dessous une chambre de combustion séparée d'un réacteur Rolls-Royce. Les vannes vrilles situées autour de l'injecteur créent des tourbillons (swirl) de l'air permettant d'optimiser le mélange air/carburant, pendant qu'une multitude de trous localisés dans les parois du "bol" créent une recirculation des gaz brûlés afin d'améliorer le mélange air/carburant et de stabiliser la zone de combustion.





## 5. Construction des turbomachines

Ci-dessous la photographie d'un tube à flammes. Avec ses différents trous pour faire pénétrer l'air à l'intérieur du tube. Certains trous servent à refroidir la paroi du tube et d'autres servent à la dilution pour mélanger correctement l'écoulement de l'air.

## Chambre de combustion



## 5. Construction des turbomachines

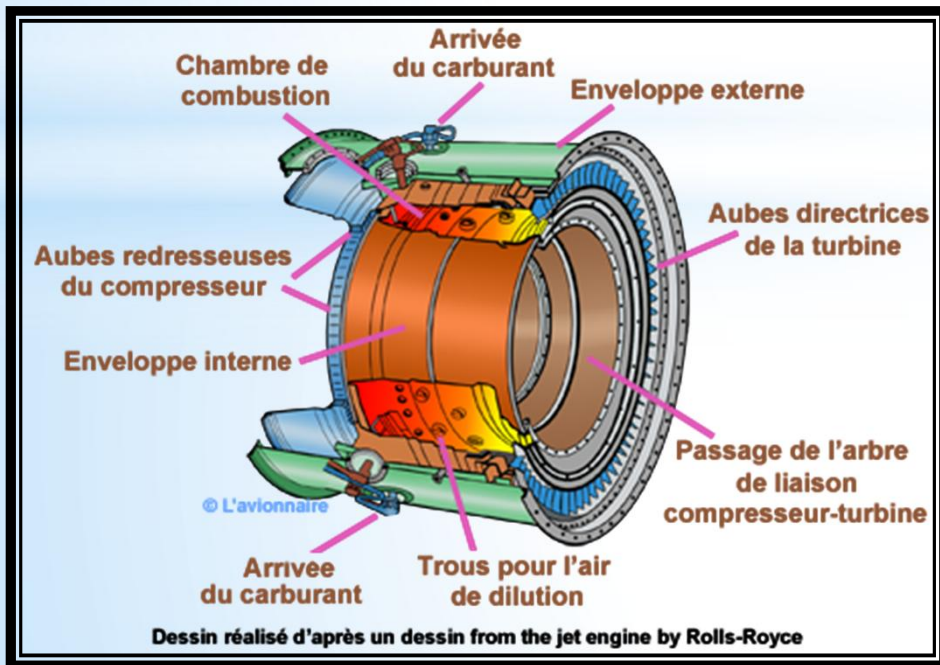
Deux types de chambres de combustion sont principalement rencontrées dans le milieu aéronautique pour les turbines à gaz : les chambres séparées réparties autour de l'arbre de liaison compresseur/turbine et les chambres annulaires à l'intérieur desquelles passe l'arbre de liaison compresseur/turbine.

## Chambre de combustion

### Chambre annulaire

Dans les chambres annulaires l'ensemble du flux gazeux circule dans le même contenant. Les injecteurs de carburant sont répartis régulièrement dans la chambre et la multiplication du nombre de jets favorise l'homogénéité du mélange.

La mise au point de ces types de chambres pour des turbines de grandes tailles sont rendues, en raison des débits importants plus délicates. Par contre la forme compacte permet un minimum de pertes de charge.



## 5. Construction des turbomachines

## Chambre de combustion

En pratique



5. Construction des  
turbomachines

Chambre de  
combustion

En pratique

## 5. Construction des turbomachines

## Chambre de combustion

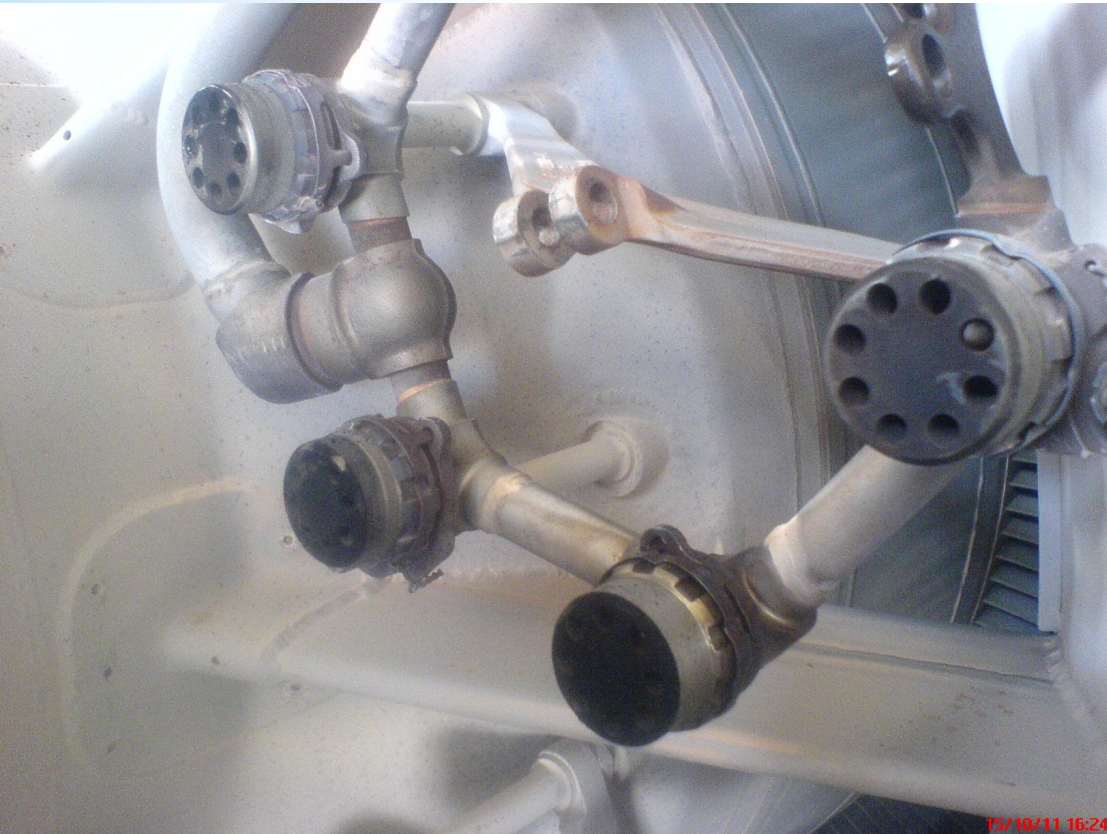
## En pratique



## 5. Construction des turbomachines

## Chambre de combustion

En pratique



15/10/11 16:24

## 5. Construction des turbomachines

## Chambre de combustion

## En pratique



5. Construction des  
turbomachines

Chambre de  
combustion

En pratique



## 5. Construction des turbomachines

Chambre de  
combustion

En pratique

5. Construction des  
turbomachines

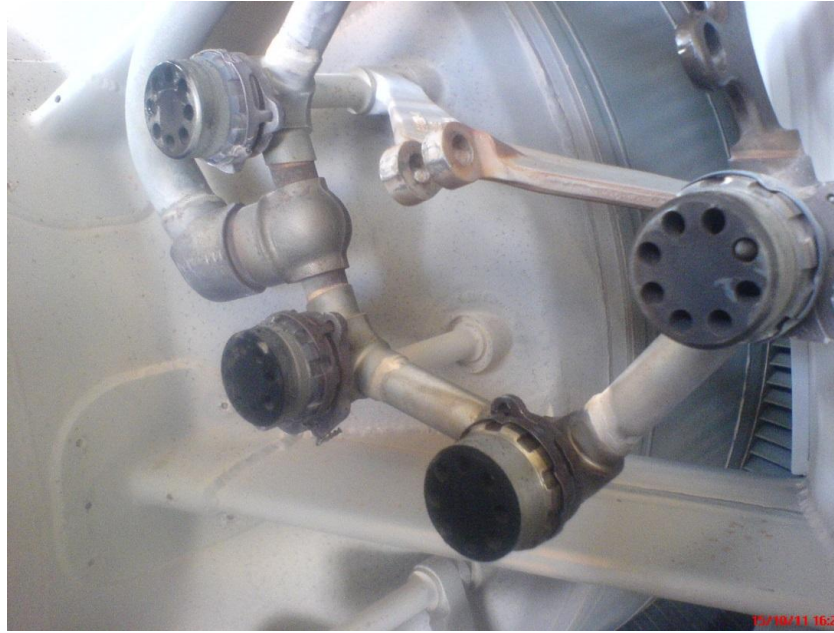
Chambre de  
combustion

En pratique

## Carburant

Fuel gaz, kérosène,  
mazout ....

Selon le système  
d'injection de  
carburant

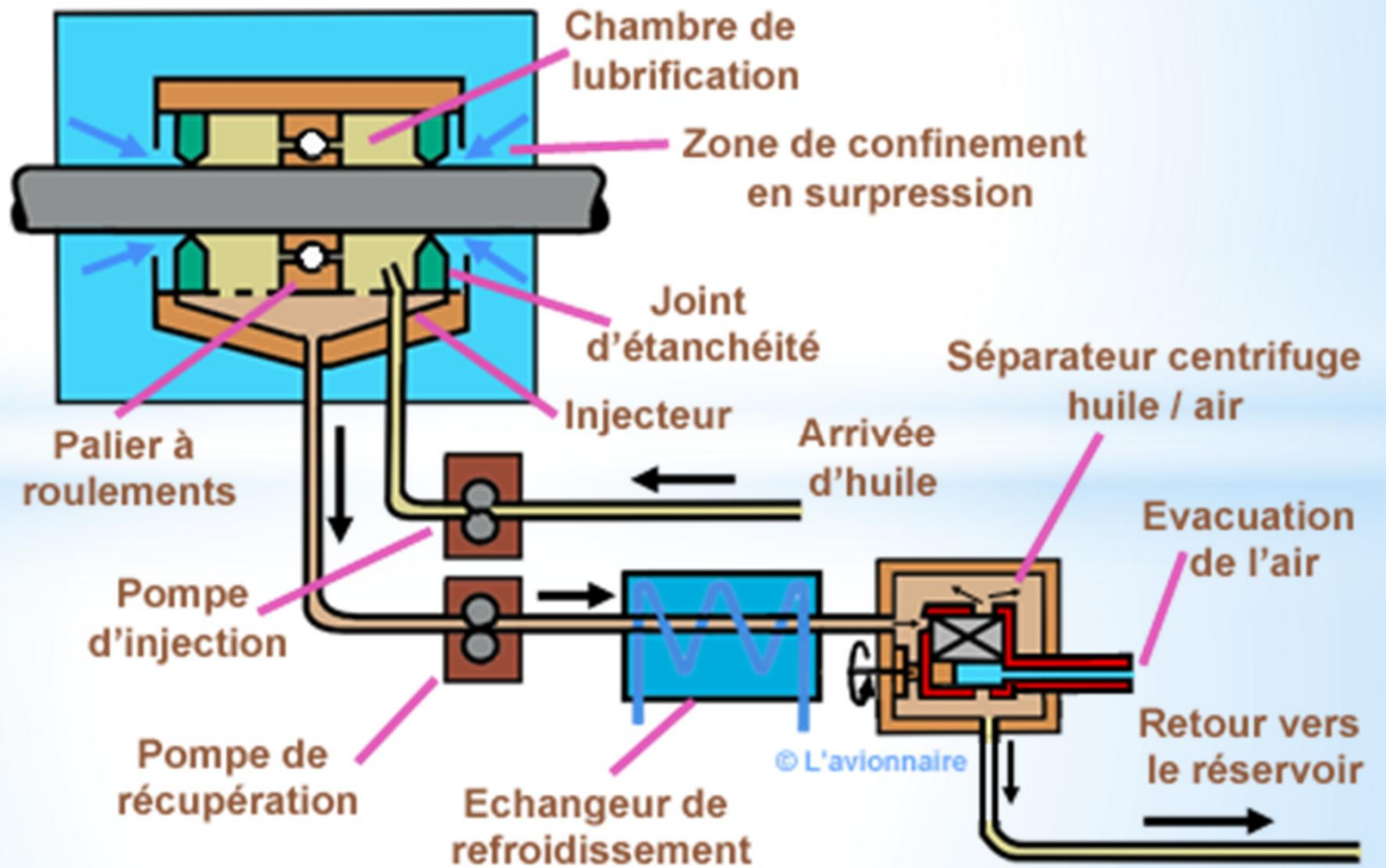


5.  
Construction  
des  
turbomachines

En pratique

## 5. Construction des turbomachines

## systemes de lubrification et d'étanchéité



## 5. Construction des turbomachines

## systemes de lubrification et d'étanchéité



## 5. Construction des turbomachines

## systemes de lubrification et d'étanchéité



## 5. Construction des turbomachines

## systemes de lubrification et d'étanchéité



## 5. Construction des turbomachines

# Refroidissement des turbomachines

L'amélioration des performances et des rendements des turboréacteurs passe par l'augmentation de la température des gaz dans la chambre de combustion. Il est donc nécessaire de refroidir les pièces sollicitées thermiquement, telles que:

- la ou les chambres de combustion
- les aubes des distributeurs turbines haute et basse pression
- les ailettes des turbines haute et basse pression
- la pressurisation des paliers des compresseurs et des turbines
- les accessoires
- les carénages et les bras radiaux.
- etc...

Chaque type de turboréacteur est différent mais le principe général pour le refroidissement reste le même sur le dessin ci-dessous:

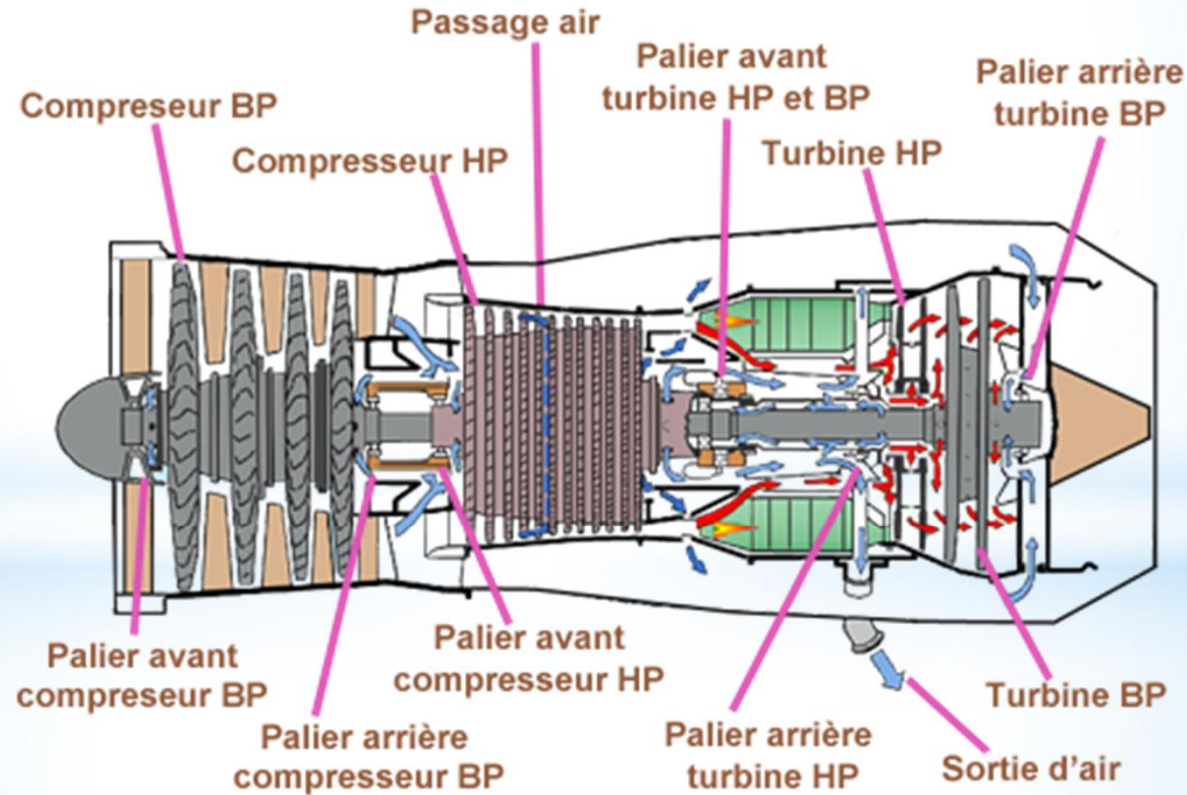
- l'air provenant du compresseur BP sert à refroidir les cavités du moteur et à refroidir et pressuriser les paliers.
- l'air provenant du cinquième étage du compresseur HP sert à refroidir une autre partie du moteur.
- l'air sortant du compresseur HP va refroidir les distributeurs haute et basse pression ainsi que les ailettes des turbines haute et basse pression,




A noter que d'autres prélèvements d'air sont utilisés pour la climatisation de la cabine passagers, du poste de pilotage, des soutes à bagages et pour le dégivrage de la cellule.



## 5. Construction des turbomachines

# Refroidissement des turbomachines

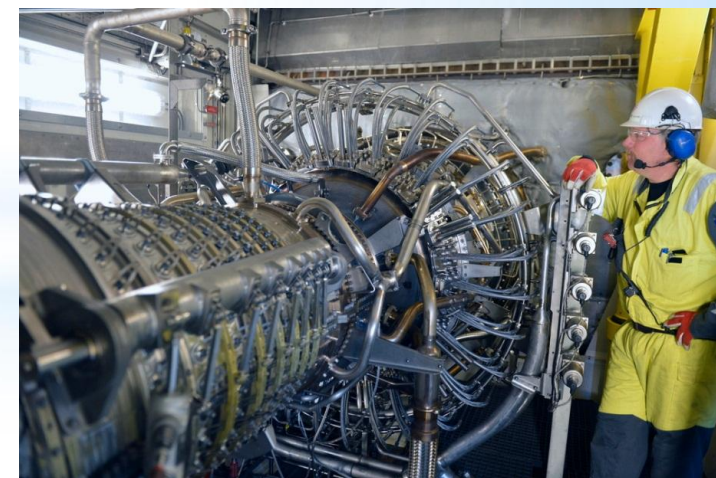
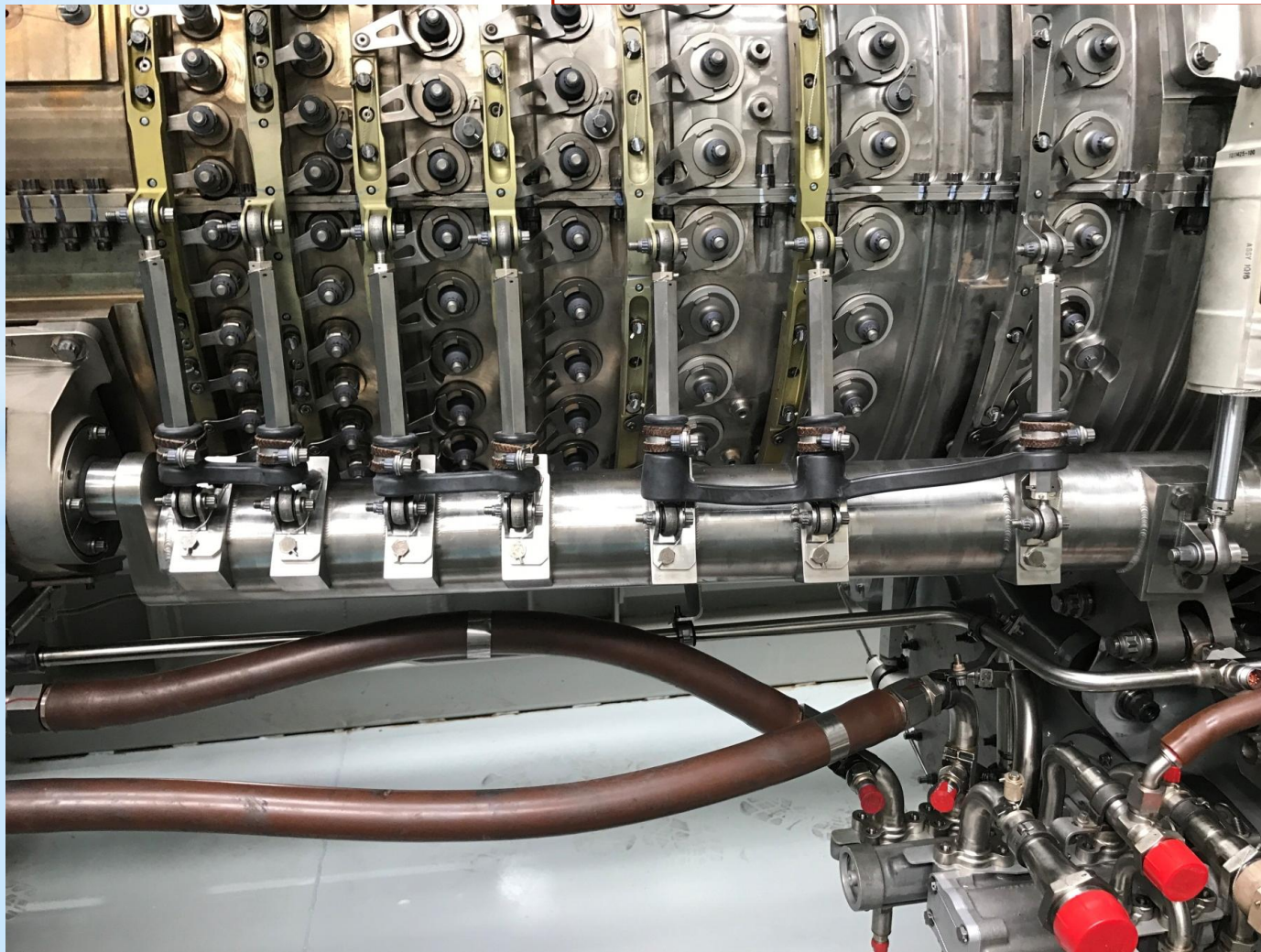


-  air pris à la sortie du compresseur BP
-  air pris au milieu du compresseur HP
-  air pris à la sortie du compresseur HP

Dessin réalisé d'après un dessin from the jet engine by Rolls-Royce

## 5. Construction des turbomachines

disques actuateurs  
Pour éviter le phénomène de pompage



5. Construction des  
turbomachines

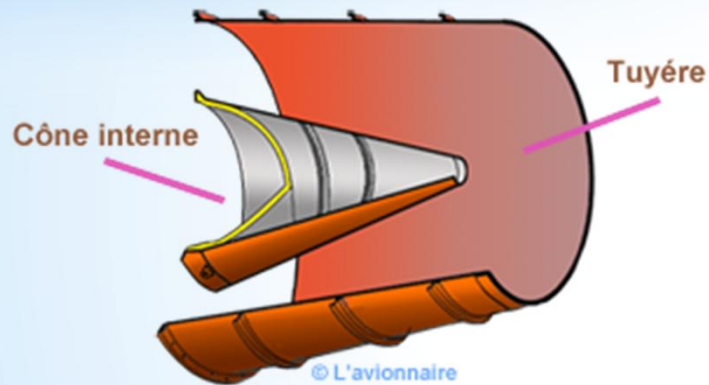
disques actuateurs  
Pour éviter le phénomène de pompage

## 5. Construction des turbomachines

### tuyères

#### *Rôle*

Le rôle de la tuyère est d'évacuer les gaz chauds sous pression sortant des turbines en leur communiquant le maximum de vitesse et obtenir le maximum de poussée. Elle est en général de section convergente puis divergente ou simplement convergente.



5. Construction des  
turbomachines

tuyères

5. Construction des  
turbomachines

Moteur de lancement

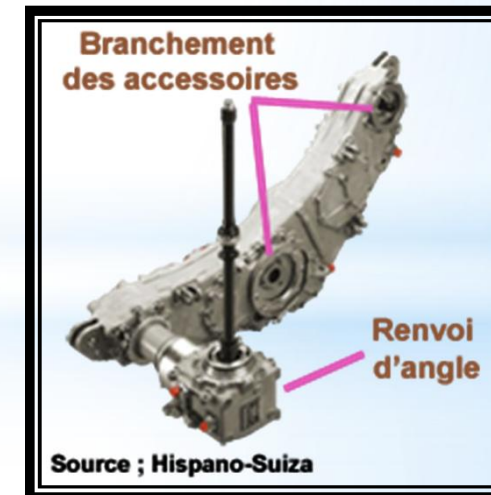
## 5. Construction des turbomachines

### Les boîtiers d'accessoires

Un boîtier d'accessoires ou AGB accessory gearbox (en anglais) comprend généralement un ou plusieurs trains d'engrenages qui sont entraînés en rotation par un prélèvement mécanique au moyen d'un renvoi d'angle sur l'arbre du compresseur et sur lesquels viennent se coupler les différents accessoires tels que:

- les générateurs électriques
- les pompes mécaniques pour l'hydraulique
- les pompes de carburant haute pression
- les pompes pour lubrification
- etc...

Ci-dessous le boîtier d'accessoires d'Hispano-Suiza pour les moteurs CFM56.



## 5. Construction des turbomachines

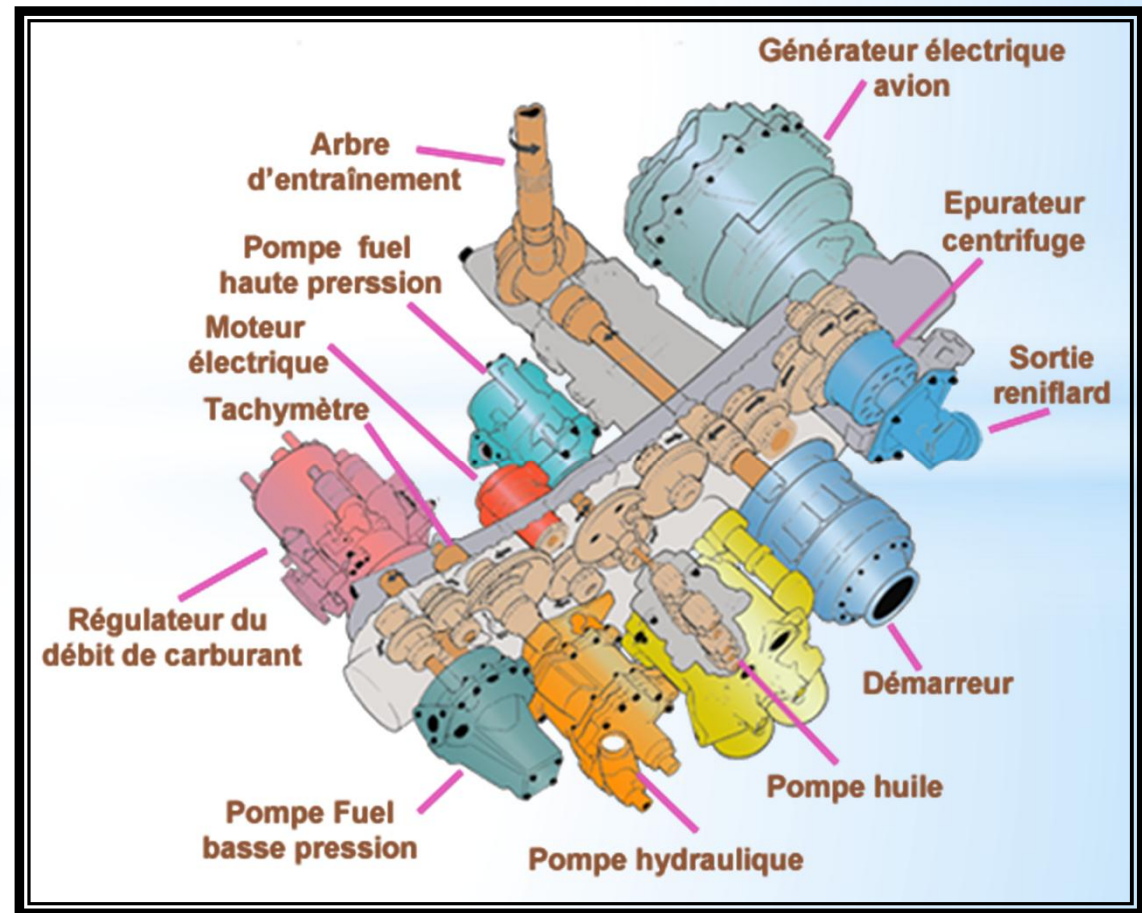
## Les boîtiers d'accessoires

Dans les turboréacteurs de la famille CFM®, les boîtiers d'accessoires sont généralement montés dans la zone du compartiment de soufflante. Ils sont plus précisément suspendus à des brides formées sur le carter métallique de rétention de ce compartiment de soufflante.

(Voir Turboréacteur double flux avec grande soufflante).

Ils peuvent être également montés dans le compartiment core (ou compartiment central) du turboréacteur, et plus particulièrement autour du compresseur haute pression du turboréacteur.

Schéma d'un boîtier d'accessoires





## 5. Construction des turbomachines

### Corps et Diaphragme de turbine

Les turbines à gaz ont des aubes rotatives et des aubes fixes. Ces dernières sont fixées sur le diaphragme.



## 5. Construction des turbomachines

### compresseurs

#### Rôle

Le rôle du compresseur est d'aspirer et de comprimer l'air pour l'amener à des vitesses, pressions et températures optimales à l'entrée de la chambre de combustion.

Il existe deux sortes principales de compresseurs :

- les compresseurs centrifuges
- les compresseurs axiaux

Il y a également une solution mixte : le compresseur « axialo-centrifuge ».

Afin d'éviter les confusions ou malentendus on désigne dans le "jargon" motoriste par :

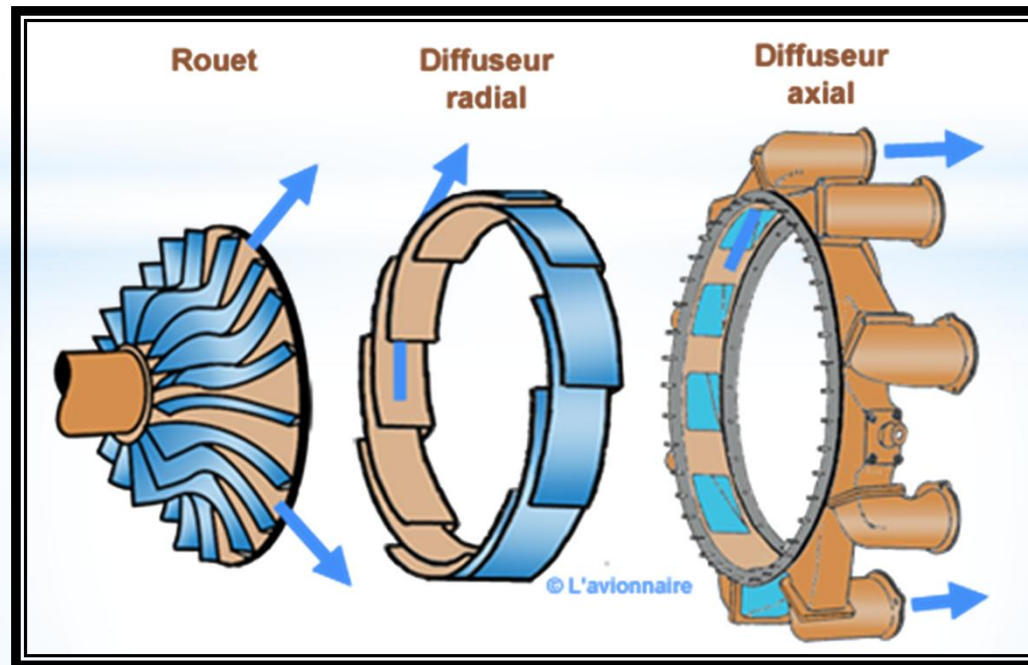
- rouet : l'organe mobile du compresseur centrifuge
- diffuseur : l'organe fixe du compresseur centrifuge
- rotor : l'organe mobile du compresseur axial
- redresseur : l'organe fixe du compresseur axial

## 5. Construction des turbomachines

### compresseurs

Les compresseurs centrifuges

Un compresseur centrifuge est composé d'un rouet à palettes radiales qui aspire l'air axialement et de deux diffuseurs.

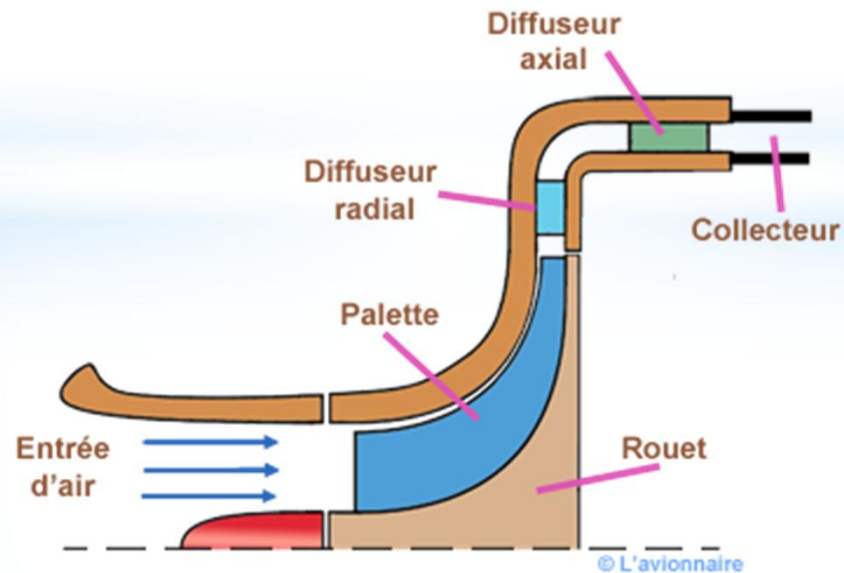


## 5. Construction des turbomachines

### compresseurs

#### Principe de fonctionnement

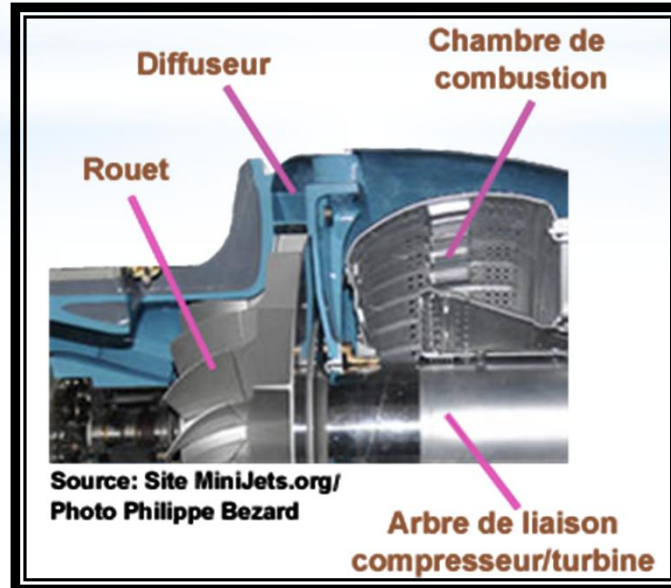
Les palettes étant divergentes, l'air sous l'effet de la force centrifuge va être accéléré, comprimé et refoulé radialement. Cet air passe ensuite dans deux diffuseurs, le premier radial, le second axial pour être redressé. Une partie de la vitesse de l'air est alors transformée en pression. Un collecteur récupère finalement cet air comprimé pour l'amener dans l'axe de la chambre de combustion.



## 5. Construction des turbomachines

## compresseurs

Un tel compresseur présente l'avantage de fournir un taux de compression important en un seul étage. Exemple le turboréacteur MARBORE VI qui équipait le Fouga Magister avait un rapport de compression de 3,80 / 1 à 21.500 tr/mn (Photo ci-dessous). En contre-partie, son encombrement radial important le destine plus à des turboréacteurs de faible puissance.



Les compresseurs axiaux

Un turboréacteur est généralement composé :

- d'un compresseur basse pression
- d'un compresseur haute pression

Le taux de compression des compresseurs est lié à sa vitesse de rotation et au nombre d'étages qu'il comporte.

Conçus de la même manière, les compresseurs basse et haute pression se différencient par la taille de leurs aubes et par leur vitesse de rotation.

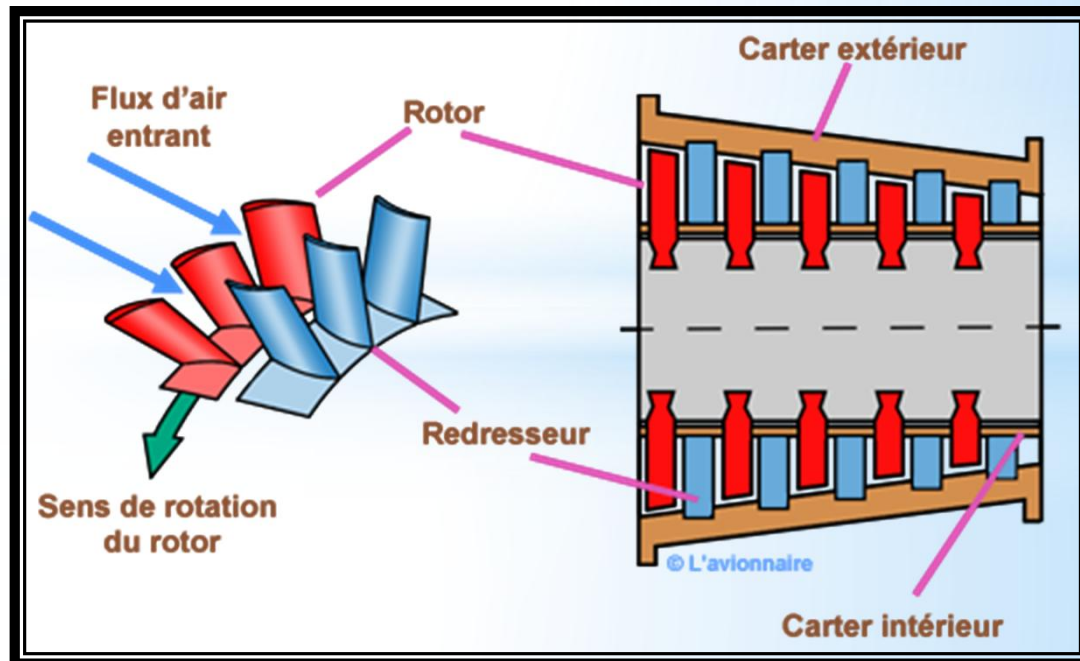
Un compresseur axial se compose d'une suite d'étages axiaux disposés en série chacun comprenant une roue à aubes mobile rotor et d'un stator à aubes redresseur, tous ces étages sont calculés pour adapter parfaitement leurs conditions de fonctionnement à celles des étages en amont et en aval.

L'aubage mobile rotor est constitué d'un disque circulaire sur lequel sont fixées des aubes (ailettes) et tourne devant l'aubage fixe redresseur.

L'envergure des ailettes varie le long de l'écoulement pour compenser les variations de la masse volumique du fluide et pour conserver à la vitesse débitante axiale une valeur constante (voir dessin ci-dessous).

## 5. Construction des turbomachines

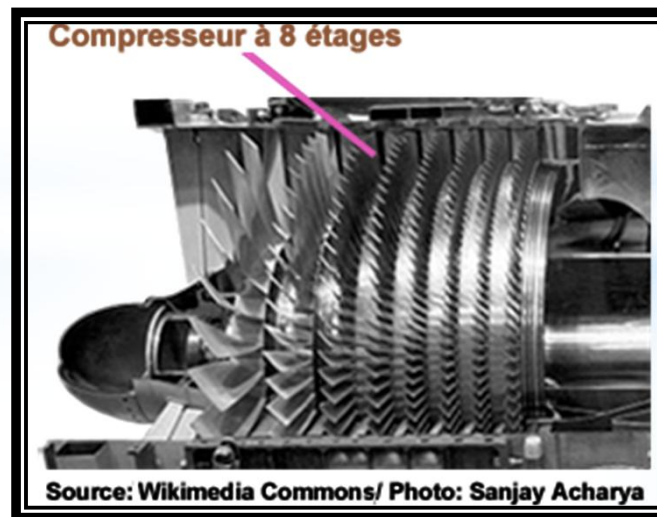
### compresseurs



## 5. Construction des turbomachines

## compresseurs

Ci-dessous le compresseur du General Electric J85-GE-17A turbojet engine



## 5. Construction des turbomachines

### compresseurs

Suite au progrès obtenu sur les machines outils une nouvelle conception, dénommée DAM (Disque Aubagé Monobloc), est depuis plusieurs années mise en place sur les moteurs d'avion. Elle se compose d'une structure monobloc dans laquelle sont usinés les aubes et le disque.

#### Principe de fonctionnement

- le rotor aspire et accélère le flux d'air en le déviant par rapport à l'axe du moteur.
- le redresseur ou stator qui suit, redresse le flux dans l'axe et le ralentit en transformant une partie de sa vitesse en pression.
- le rotor suivant réaccélère le flux d'air en le déviant à nouveau de l'axe du moteur.
- le stator suivant va de nouveau redresser le flux le ralentir et transformer sa vitesse en pression.

Etc... etc... etc...

L'augmentation du taux de compression pour un seul étage de compresseur axial d'un turboréacteur civil est de 1,15 à 1,16 en condition d'utilisation optimale. C'est pour cette raison qu'un compresseur complet possède de nombreux étages.

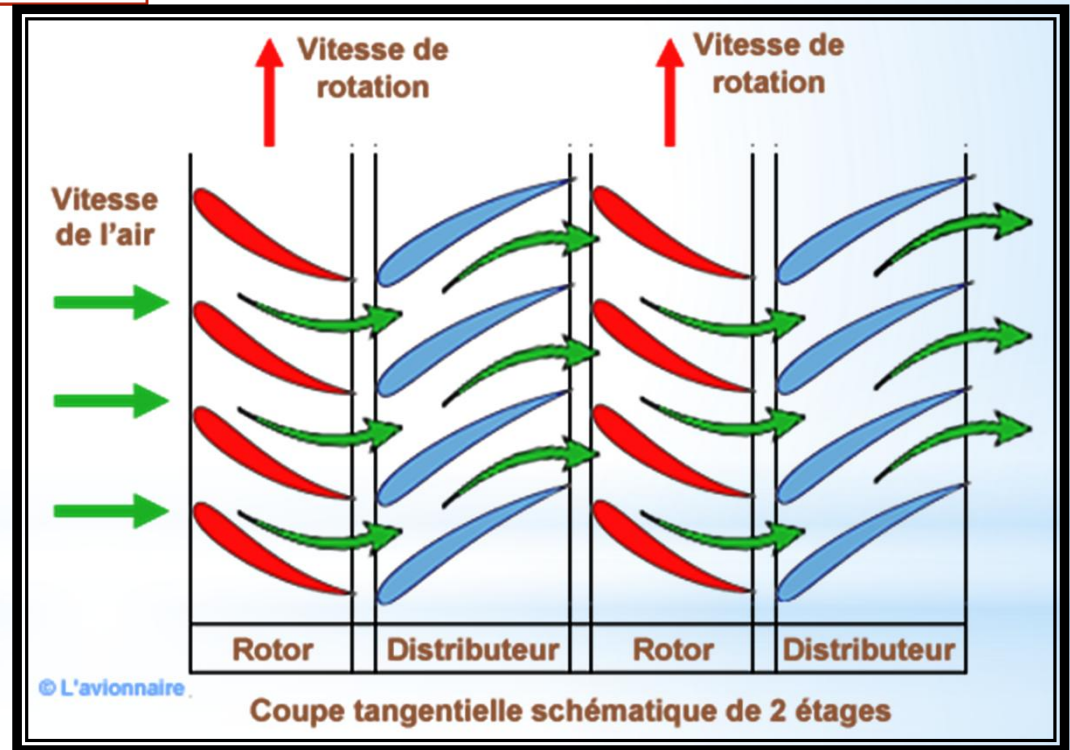
Les performances d'un étage de compresseur sont caractérisées par:

- son débit d'air  $Q$
- son taux de compression ou rapport de pression  $P/P_0$ .
- son rendement  $\eta$ .



## 5. Construction des turbomachines

## compresseurs



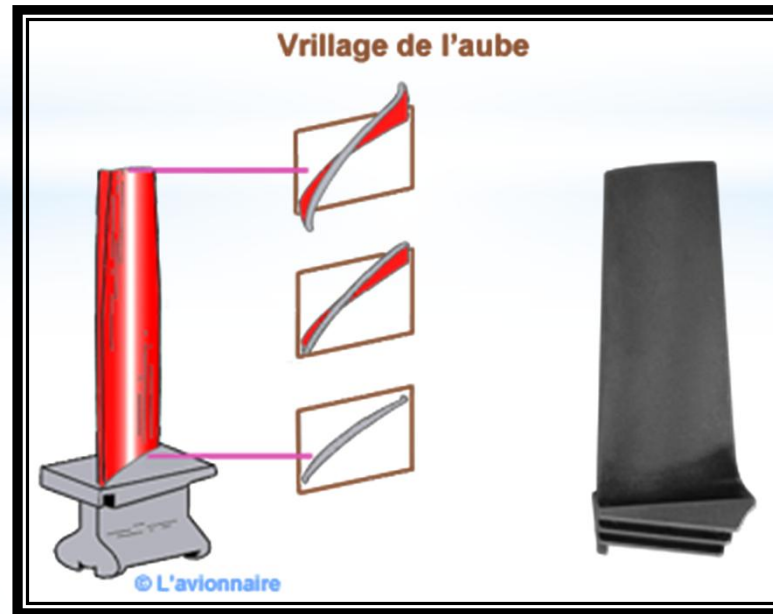
Le flux d'air étant de plus en plus comprimé va occuper un volume de plus en plus restreint. C'est pour cette raison que la hauteur des aubes est de plus en plus faible. A noter que de l'entrée à la sortie du compresseur le débit d'air reste constant si on ne tient pas compte des prélèvements pour le refroidissement des turbines, climatisation de la cellule, étanchéité des paliers etc....

## 5. Construction des turbomachines

### compresseurs

#### Les aubes du rotor

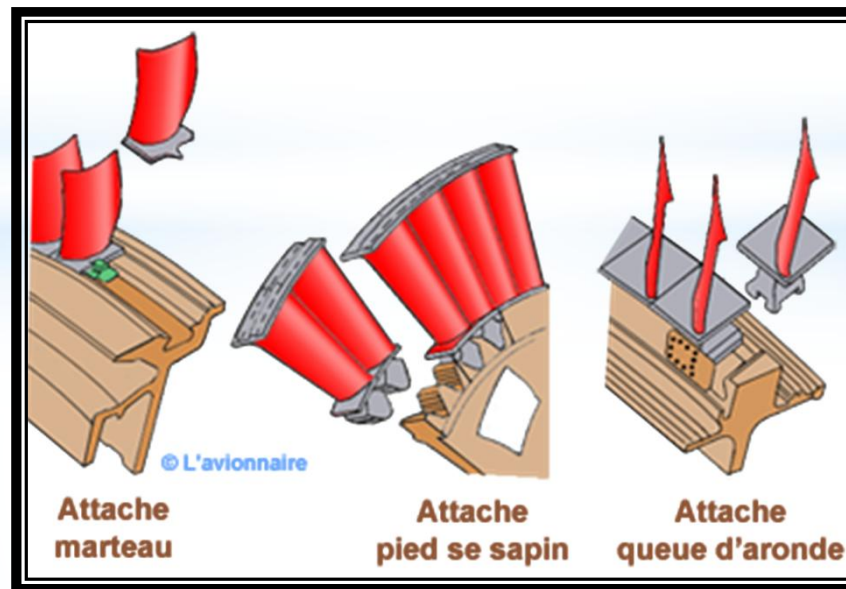
Comme une aile, une aube est composée d'un bord d'attaque d'une âme et d'un bord de fuite, et son profil est optimisé pour respecter le domaine d'utilisation de l'étage du compresseur auquel elle appartient.



## 5. Construction des turbomachines

## compresseurs

Il y a différentes technologies de liaison entre le disque (roue) et l'aube suivant les constructeurs et les compresseurs. En voici quelque unes.



## 5. Construction des turbomachines

### compresseurs

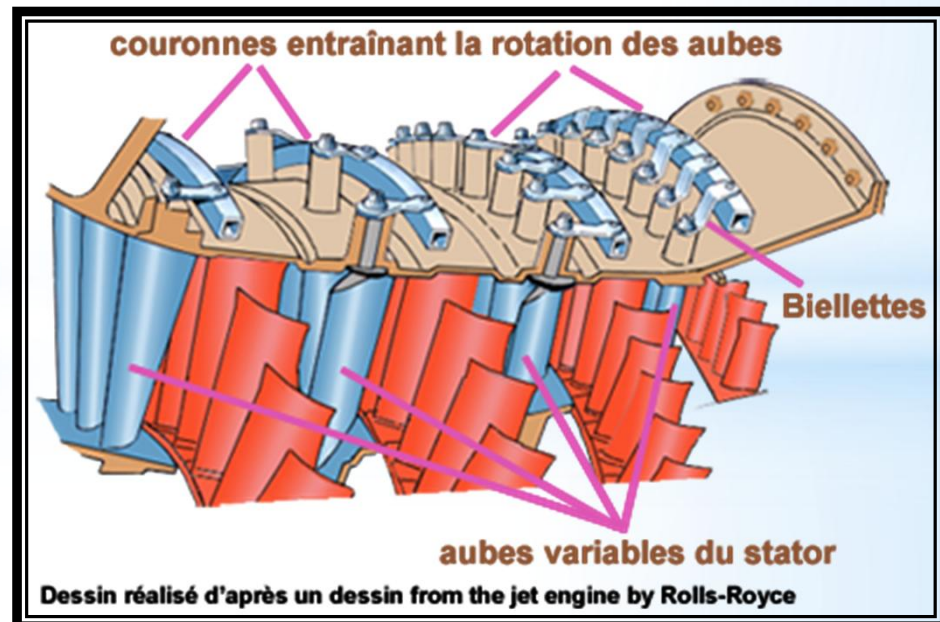
Les aubes du stator ou redresseur

Comme les aubes du rotor, les aubes de stator ont une forme de profil d'aile. En outre, l'angle d'attaque des aubes de stator peuvent être fixes ou variables.

Ces aubes à calage variable sont portées par le carter du stator et sont réglables en position autour de leurs axes pour optimiser l'écoulement des gaz. L'angle d'attaque des aubes est contrôlé en fonction des conditions de fonctionnement par un système d'asservissement qui commande le déplacement d'une couronne rotative, extérieure au carter et reliée aux dites aubes par des biellettes respectives.

Le système d'asservissement peut être électrique, pneumatique ou hydraulique, il est commandé par l'unité de commande de carburant.

Ci-dessous en bleu les aubes du stator (redresseur) et en rouge les aubes du rotor.

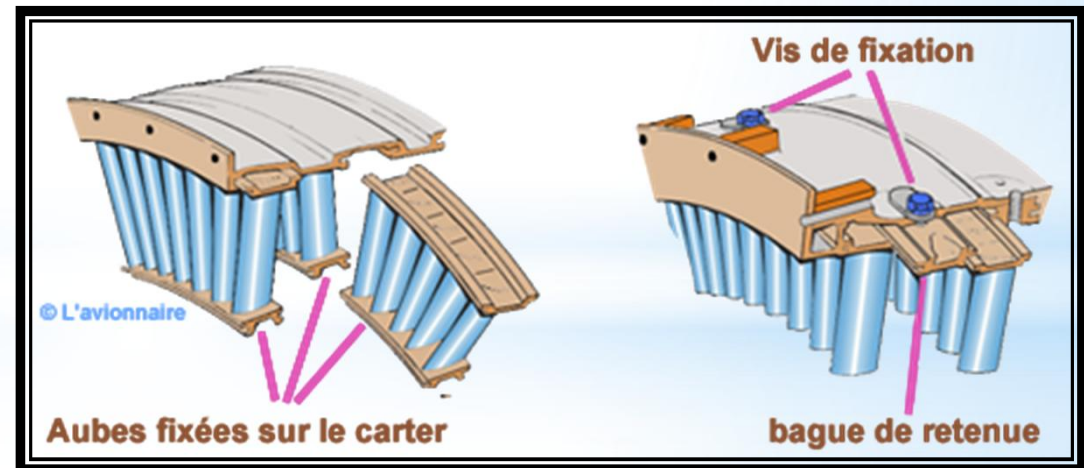


## 5. Construction des turbomachines

### compresseurs

Les aubes de stator peuvent être fixées directement sur le carter du compresseur ou par un anneau de retenue qui est fixé sur le carter de compresseur. La plupart des aubes de stator sont fixées par groupes (5 à 6 aubes) avec un pied en queue d'aronde.

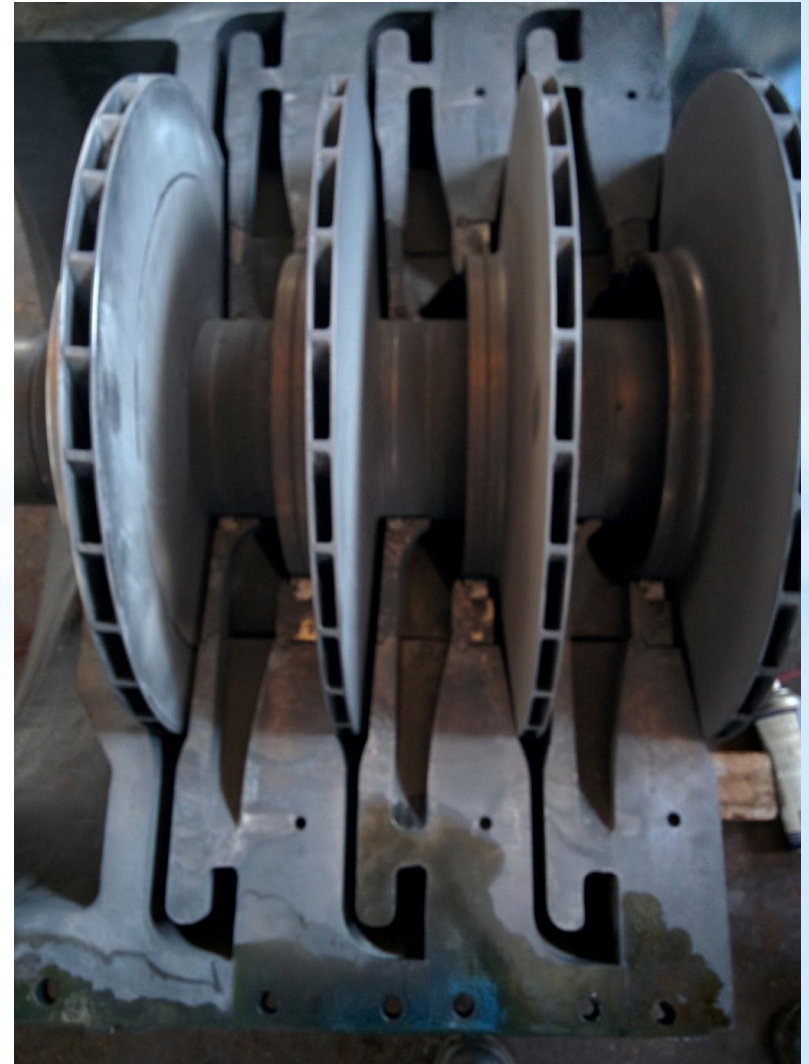
Ci-dessous à gauche les aubes du redresseur (stator) sont fixées directement sur le carter de compresseur, à droite, les aubes sont fixées au carter par une bague de retenue.



## 5. Construction des turbomachines

## systemes de lubrification et d'étanchéité

### Systeme d'étanchéité

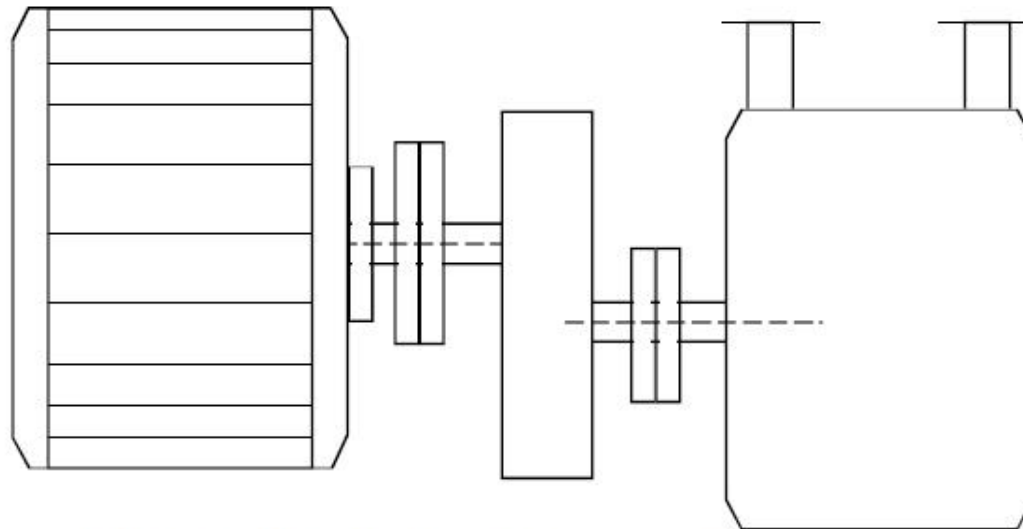


## 5. Construction des turbomachines

## Accouplements et réducteurs

Multiplicateur

Moteur électrique



Compresseur

**Figure 4.6 Entraînement par un moteur électrique**

### 4.2 Dispositif d'entraînement

Les compresseurs peuvent être entraînés par une turbine à vapeur (groupe turbocompresseur), un moteur électrique (groupe moto compresseur) et quelquefois une turbine à gaz.

#### ➤ **Entraînement par turbine**

La turbine accouplée directement au compresseur et tourne donc à la même vitesse que lui (5000 tr/min à 12 000 tr/min).

#### ➤ **Entraînement par un moteur électrique**

Le moteur électrique entraîne dans ce cas le compresseur à haute vitesse, par l'intermédiaire d'un multiplicateur. Dans certaines applications, le multiplicateur est intégré au compresseur (compresseurs d'air, compresseurs de vapeur d'eau). Dans le cas de moteur à vitesse fixe, il est nécessaire de prévoir un système supplémentaire de réglage du débit.



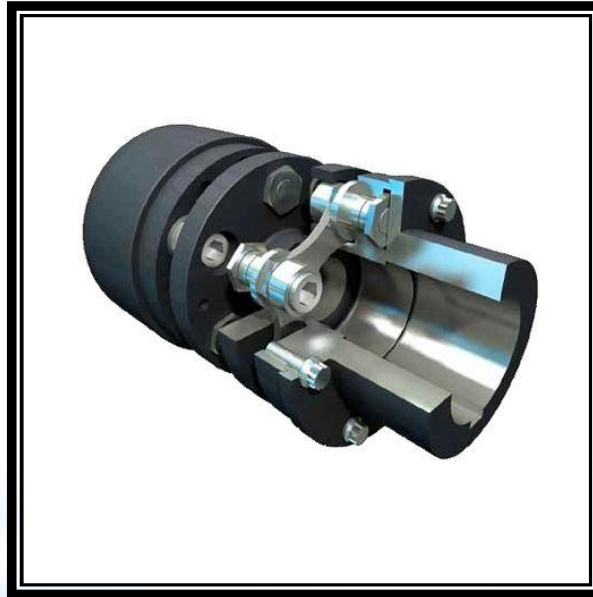
5. Construction des  
turbomachines

Accouplements et réducteurs

## 5. Construction des turbomachines

## Accouplements et réducteurs

Accouplement flexible  
/ pour pompe / pour  
turbine / pour moteur

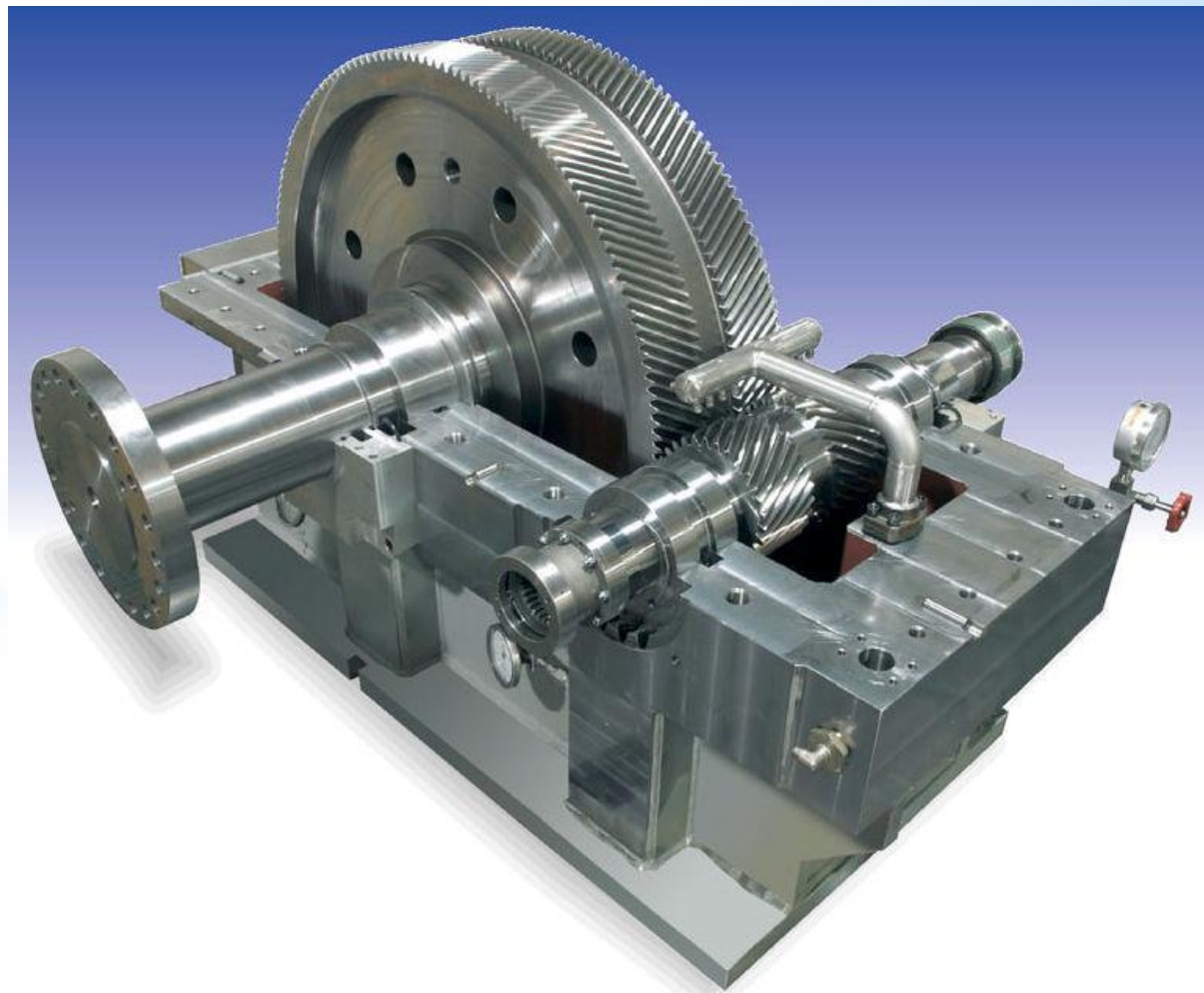


Accouplement à  
disque / pour turbine  
/ pour moteur / en  
acier inoxydable



## 5. Construction des turbomachines

## Accouplements et réducteurs



# Feeler gauge

A feeler gauge is a tool used to measure gap widths. Feeler gauges are mostly used in engineering to measure the clearance between two parts.

They consist of a number of small lengths of steel of different thicknesses with measurements marked on each piece. They are flexible enough that, even if they are all on the same hinge, several can be stacked together to gauge intermediate values. It is common to have two sets for imperial units (typically measured in thousandths of an inch) and metric (typically measured in hundredths of a millimetre) measurements.

A similar device with wires of specific diameter instead of flat blades is used to set the gap in spark plugs to the correct size; this is done by increasing or decreasing the gap until the gauge of the correct size just fits inside the gap.

The lengths of steel are sometimes called leaves or blades, although they have no sharp edge.





рахмат  
Баярлалаа  
спасибо  
faafetai lava  
nami  
nandri  
kiitos  
dankie  
dhanyavad  
bayarlalaa  
gracie  
hvala  
mauruuru  
koszonom  
nandri  
nami  
kiitos  
dankie  
dhanyavad  
bayarlalaa  
gracie  
hvala  
mauruuru  
koszonom

謝謝  
merci  
kia ora  
barka  
welalin  
tack  
spas

ngiyabonga

شكراً جزيلاً

teşekkür ederim

спасибо

thank you

gracias

tapadh leat

dziękuję

sukriya

kop khun krap

taiku

go raibh maith agat

obrigado

sagolun

ありがとう

grazie

arigatō

takk

dakujem

terima kasih

tanemirt  
rahmet

grazie

arigatō

takk

dakujem

merci

감사합니다

xiexie

merci

তোমাকে ধন্যবাদ

rahmat

terima kasih

tanemirt  
rahmet

grazie

arigatō

takk

dakujem

merci

takk

dakujem

merci

merci

хвала  
asante  
manana  
obrigada  
terki

djiere dieuf  
tau  
mochchakkeram

go raibh maith agat

chnorakaloutioun  
gracias apo  
gracies

sulpay

taiku

go raibh maith agat

go raibh maith agat

sobodi  
dekuji

dziękuję

sukriya

kop khun krap

taiku

go raibh maith agat

go raibh maith agat

sobodi  
dekuji

dziękuję

sukriya

kop khun krap

taiku

go raibh maith agat

go raibh maith agat

sobodi  
dekuji

dziękuję

sukriya

kop khun krap

taiku

go raibh maith agat

go raibh maith agat

sobodi  
dekuji

dziękuję

sukriya

kop khun krap

taiku

go raibh maith agat

go raibh maith agat

sobodi  
dekuji

dziękuję

sukriya

kop khun krap

taiku

go raibh maith agat

go raibh maith agat